

Estudo Experimental das Tensões e Deformações de uma Rocha Carbonática Sintética Durante a Dissolução Química

Katia Botelho Torres Galindo
UFPE, Recife, Brasil, katiabotelho4@gmail.com

Cecília Maria Mota Silva Lins
UFRPE, Recife, Brasil, cecilia.lins@gmail.com

Analice Lima Amorim
UFPE, Recife, Brasil, analicelima@hotmail.com

Leonardo José do Nascimento Guimarães
UFPE, Recife, Brasil, leonardo@lmcg.ufpe.br

Deodório Barbosa de Souza
UFPE, Recife, Brasil, deodoriobs@gmail.com

Camila Freire Nunes
UFPE, Recife, Brasil, caamilanunes31@gmail.com

RESUMO: A injeção em larga escala do CO₂ e outros gases em reservatórios geológicos pode induzir a uma complexa interação de fluxo multifásico, difusão, convecção, dissolução, precipitação e outras reações químicas. 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. Neste contexto, os mecanismos físicos e químicos na interação rocha-fluido afeta o comportamento mecânico da rocha, diminuindo sua resistência quando submetidas às variadas condições de carregamento, podendo assim levar ao enfraquecimento pela perda de rigidez ou resistência mecânica. Desta forma, esta pesquisa tem como o objetivo estudar as tensões e deformações de uma rocha carbonática sintética durante a dissolução dos minerais a partir de ensaios edométricos, a fim de representar e entender o comportamento geomecânico e geoquímico da rocha durante a dissolução dos minerais. Desta forma, foram realizados ensaios de dissolução total através de uma célula edométrica modificada, permitindo assim o fluxo controlado de uma solução ácida através dos poros da rocha sintética. A partir dos resultados dos ensaios de dissolução dos minerais foi verificado que a tensão horizontal aumenta linearmente, assim como a medida que a tensão horizontal aumenta, a deformação vertical acelera. Desta forma, verificou-se que a resistência à compressão simples da amostra sintética é de 3530 kPa, o processo de dissolução dos minerais tem como consequência o aumento da porosidade em 46,4% da rocha, podendo provocar a compactação induzida quimicamente do reservatório e o decréscimo da resistência.

PALAVRAS-CHAVE: Dissolução química, Ensaio edométrico, Rocha carbonática sintética.

1 INTRODUÇÃO

Na engenharia de reservatórios é extremamente necessário o conhecimento da estrutura geológica de determinado campo e de suas propriedades físicas, tendo em vista o impacto destas características no regime de fluxo de fluido no interior do reservatório e no entendimento do comportamento mecânico das rochas (GOMES, 2009), entre outras importantes propriedades destacam-se a porosidade, permeabilidade e a compressibilidade.

A rocha carbonática é um exemplo importante de rocha reservatório, pois cerca de 50% das reservas de petróleo do mundo estão contidos em reservatório carbonáticos, (SPADINI e MARÇAL, 2005), e ainda por serem rochas porosas e permeáveis que contém hidrocarbonetos. Estes reservatórios apresentam características petrofísicas e geológicas complexas e heterogêneas, geralmente são múltiplos sistemas de porosidade que, caracteristicamente, concede heterogeneidade petrofísica aos reservatórios, devido à processos de dissolução, dolomitização e fraturamento (AHR, 2008), sendo importante para área de engenharia de reservatório o entendimento dos processos geomecânicos e geoquímicos provocados pela injeção de fluidos nestas rochas carbonáticas.

Os processos de injeção e a extração de fluidos em reservatórios 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, que ocorrem devido à interação de um fluxo de fluido reativo com o meio, que provocam alterações das suas propriedades como porosidade, o que influi diretamente na sua fluidez e transporte (GUIMARÃES et al., 2006). Além disso, as rochas estão sujeitas a mudanças contínuas induzidas por processos de intemperismo seja de origem natural e / ou antrópico. Tais mudanças afetam suas propriedades mecânicas, como de resistência, deformabilidade, grau de fragilidade e permeabilidade (FERNANDEZ-MERODO, et

al., 2007).

Nas rochas reservatório, por exemplo, os fluidos devem conter uma determinada quantidade de energia para serem produzidos, essa energia é devida dois efeitos principais: descompressão (que causa a expansão dos fluidos contidos no reservatório e a contração do volume poroso) e o deslocamento de um fluido por outro fluido (por exemplo, a invasão da zona de óleo pela água de um aquífero) (SARAIVA, 2010).

Os processos de dissolução ou precipitação de minerais em uma rocha reservatório podem ocorrer devido à interação de um fluxo de fluido reativo com o meio, que provocam alterações das suas propriedades como porosidade, permeabilidade, pressão capilar, e distribuição dos poros, o que influi diretamente na sua fluidez e transporte. Essas interações podem acarretar problemas de fluxo multifásico, incluindo a acidificação do reservatório pelo armazenamento geológico de CO₂, recuperação avançada de petróleo ou gás, e sistemas geotérmicos (RÖTTING, et al., 2015).

O armazenamento geológico de CO₂ consiste em capturar e imobilizar esse gás em locais que não afetem os ecossistemas e onde não exista a possibilidade de vazamentos. Portanto todos os processos envolvidos dependem principalmente da reatividade do gás nas condições de temperatura e pressão às quais está submetido, pode induzir a uma complexa interação de fluxo multifásico, difusão, convecção, dissolução, precipitação e outras reações químicas (LINS., et al, 2013).

Assim, esta pesquisa tem por objetivo principal estudar experimentalmente as alterações nas tensões e deformações de uma rocha carbonática sintética a partir do ensaio edométrico submetido a um fluxo ácido, para representar e entender o seu comportamento geomecânico e geoquímico.

2 METODOLOGIA

O desenvolvimento dos ensaios de laboratório teve a finalidade de representar e entender o comportamento geomecânico e geoquímico da rocha carbonática sintética durante o processo

de dissolução química sendo executado em duas etapas: (1) coleta, produção e caracterização das amostras sintéticas e (2) ensaios de dissolução na célula edométrica, projetada especialmente para medir tensões horizontais.

2.1 Coleta e preparação das amostras sintéticas

2.1.1 Coleta

A amostra carbonática sintética desta pesquisa foi preparada de acordo com Melo (2012), sendo composta de areia quartzosa e fragmentos de algas (Halimeda) (Figura 1), provenientes das praias de Itamaracá e a praia de Tamandaré, respectivamente, localizadas no estado de Pernambuco.

A Halimeda corresponde a pedaços e fragmentos calcários de algas marinhas, representando assim um importante contribuinte de calcita (CaCO_3) para a produção de rochas carbonáticas, pois as rochas carbonáticas são compostas na sua maior parte por cristais de carbonato de cálcio na forma de calcita (CaCO_3) (MELO, 2012).



Figura 1: Coleta da Halimeda

2.1.2 Preparação das amostras de rochas sintéticas

As amostras sintéticas utilizadas nos ensaios consistiram de uma mistura de 50% de areia quartzosa, 25% de Hidróxido de Cálcio e 25% de Halimeda. Esta mistura foi compactada a 20kN e posteriormente submetida à carbonatação direta com dióxido de carbono, em seguida a amostra foi colocada na estufa a 100°C por 24h. Por fim, com o auxílio da prensa hidráulica a amostra sintética foi extraída do molde, conforme apresentado na Figura 2.

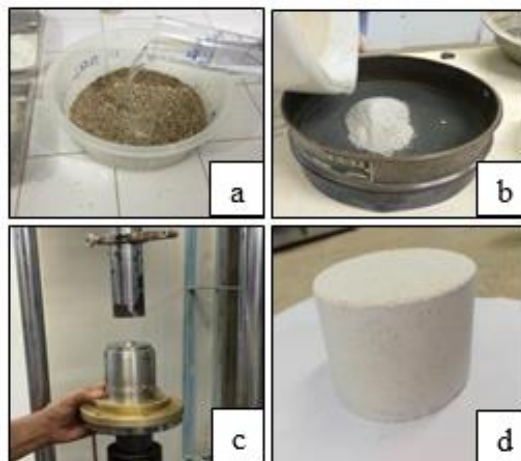


Figura 2: Preparação da amostra sintética: a) lavagem dos componentes, b) peneiramento dos componentes, c) compactação da mistura na prensa hidráulica e d) amostra sintética pronta.

2.1.3 Caracterização das amostras de rochas sintéticas

A caracterização física da rocha carbonática sintética compreendeu do estudo geológico da amostra quanto à porosidade, índice de vazios, massa específica dos grãos e sua característica geomecânica como à resistência a compressão simples.

O estudo da porosidade foi determinado a partir da equação do índice de vazios (e), como mostra a equação abaixo:

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad (1)$$

onde, (n) é a porosidade e (e) é o índice de vazios, sendo, o peso específico das partículas determinado através do procedimento do picnômetro de acordo com a norma NBR 6508.

A análise da resistência mecânica da rocha sintética foi realizada através do ensaio de compressão simples de acordo com a norma NBR 12025, no laboratório de solos da Universidade Federal de Pernambuco. A amostra foi colocada na prensa de compressão e foram feitas leituras com velocidade constante de 0.441/mm, até a ruptura da amostra. Após ruptura os resultados foram analisados e assim determinados à resistência à compressão simples da amostra.

Os ensaios com as amostras sintéticas foram executados antes e após a percolação do fluido

reativo, sendo utilizadas três amostras antes do contato com o fluido reativo e três após os ensaios de dissolução química.

2.2 Ensaios de Dissolução química

A célula edométrica utilizada nesta pesquisa permite obter valores da tensão horizontal durante os ensaios, desta forma é possível entender as consequências mecânicas da dissolução química da rocha sintética. Esta célula foi construída de acordo com Lins (2014), sendo reduzida a altura de 8 cm para 4cm, conforme sugestão do próprio autor.

A célula edométrica utilizada foi desenvolvida na Universidade Federal de Pernambuco, sendo constituída por uma liga de bronze-alumínio, constituída de um anel de confinamento com secção transversal cilíndrica com medidas de 7,0cm de diâmetro, 4,0cm de altura e 0,8mm de espessura, projetado especialmente para medir pequenas deformações radiais e tensões circunferenciais, e válvulas de entrada e saída para percolação do fluido, como representado na figura 3. As deformações horizontais serão medidas por extensômetros (*strain gages*), e as verticais pelo LVDT.

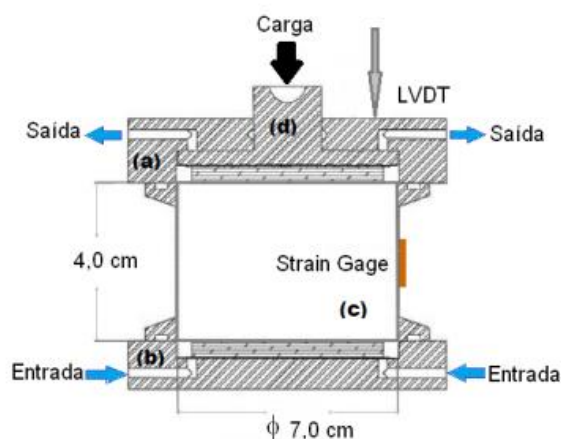


Figura 3: Ilustração da célula edométrica que é composta pela (a) parte superior e (b) inferior, (c) cilindro de confinamento da amostra, e (d) pistão para aplicação da carga (LINS, 2014).

Os ensaios de dissolução química foram realizados com o objetivo de se estudar e entender os fenômenos mecânicos e químicos durante a dissolução química na amostra

sintética, podendo assim compreender o que acontece com as rochas reservatório. Assim, as amostras foram inseridas na célula edométrica modificada, e inserida na prensa de adensamento, foi ajustado o LVDT par medição de deslocamentos verticais, e os strain gages conectados ao computador no programa de aquisição de dados para o experimento. Posteriormente, a amostra foi submetida a uma tensão vertical de 400 kPa e, após carregamento foi injetado um fluxo reativo de pH 3 com duração de 6h. Durante o ensaio foi possível medir além das tensões e deformações, a condutividade, permeabilidade e pH.

3 RESULTADOS

3.1 Caracterização da amostra.

A tabela 1 representa o resultado da porosidade ($\emptyset$) antes e após o ensaio edométrico com percolação de um fluido reativo.

Tabela 1: Avaliação da porosidade antes e após ensaio edométrico

Amostra	Ensaio	m (kg)	$\rho_d = m/v$ (kg/m ³)	n (%)
1	Pré-ensaio	0,256	1653	35,78
1	Pós-ensaio	0,242	1261	52,40

onde m é a massa, ρ_d é a massa específica seca da amostra e n é a porosidade da amostra sintética.

Observa-se na Tabela 1 que a porosidade aumenta após o ensaio edométrico com a percolação do fluido reativo, comparando com a porosidade inicial. A dissolução dos minerais de carbonato presente nas rochas sintéticas provoca o aumento de 46,4% dos espaços de vazios do meio.

A análise da resistência mecânica da rocha sintética foi realizada através do ensaio de compressão simples (Figura 4), no laboratório de solos da Universidade Federal de Pernambuco. O ensaio foi executado antes da percolação do fluido reativo, para determinação

da resistência e deformabilidade de amostras de rochas.

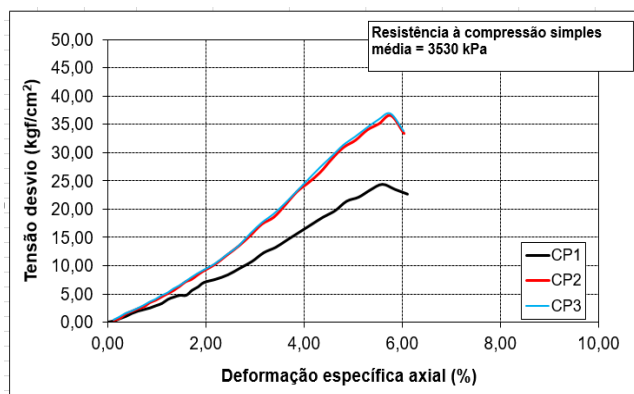


Figura 4: Resistência da amostra de rocha sintética (kPa)

Após ensaio uniaxial foi determinado que a resistência da rocha sintética é de 3530 kPa, sendo caracterizada como uma rocha carbonática sintética branda, por apresentar uma resistência baixa.

3.2 Ensaio Edométrico

As alterações nas rochas devido a interação com fluido incluem uma combinação de diferentes processos (por exemplo, ciclos de maré, mudanças de temperatura sazonais, o destino de fauna e flora marinha, armazenamento geológico em plataformas de petróleo que afetam a acidez da água) e longos períodos de tempo. Quando a água preenche os poros durante a saturação, o material enfraquece quase instantaneamente, mas apenas até um certo grau (CIANTIA *et al.*, 2014). No entanto, como a água se evapora, a resistência mecânica em seco é quase totalmente recuperada (CASTELLANZA *et al.*, 2009, CIANTIA *et al.*, 2013 e CIANTIA *et al.*, 2014). Por outro lado, se o material é mantido em contato com a água durante longos períodos de tempo, o enfraquecimento da estrutura sólida é atribuível à reação química de dissolução do carbonato de cálcio (CIANTIA e HUECKEL, 2013). Este tipo de interação é denominada como efeito de dissolução de longo prazo. Neste sentido, a interação hidro-químico-mecânica em microescala, explica os efeitos a curto e a longo prazo da dissolução.

Neste sentido a fim de discutir e explicar o ponto de vista macroscópico das consequências

de mecanismos básicos citados acima, foram representados através de ensaios experimentais mecânicos, químicos e totalmente acoplados esses efeitos. Ensaio edométrico foram realizados, com o objetivo de destacar os principais fenômenos físicos caracterizando o processo geomecânicos e geoquímicos. Durante os ensaios além das tensões e deformações, apresentados na Figura 5, também foram monitorados o pH do fluido reativo efluente e a permeabilidade da amostra.

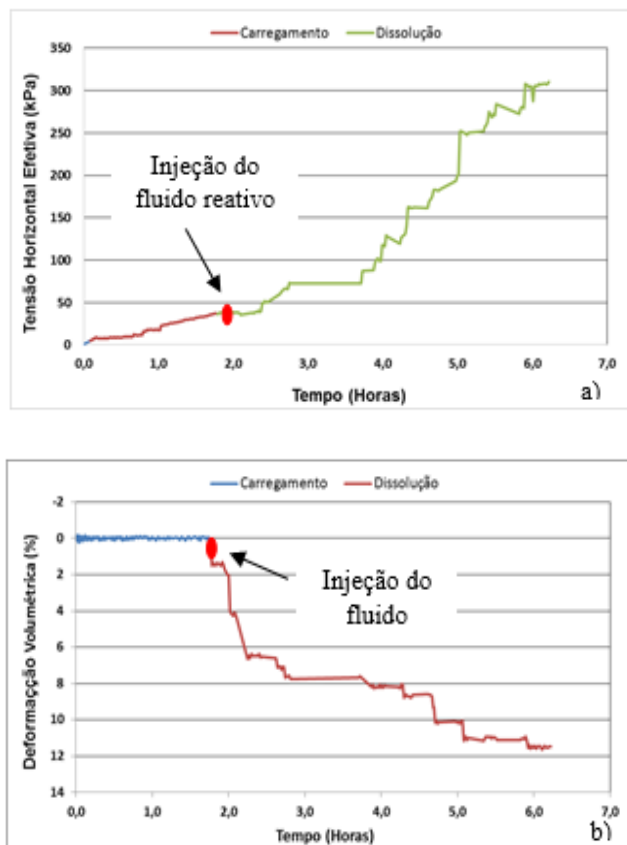


Figura 5: Ensaio de dissolução: (a) Evolução da tensão horizontal efetiva com o tempo, (b) Deformação volumétrica com o tempo.

Na Figura 5a é possível verificar que a tensão horizontal efetiva aumenta a medida que a solução ácida percola pela amostra e continua nesse comportamento até que a amostra seja toda dissolvida. A dissolução do carbonato é refletida pela mudança no pH, sendo verificado um valor inicial de 2,8 e de saída 3,7. Quanto a deformação, Figura 5b, foi observado uma deformação máxima de, aproximadamente, 12%, após o tempo de, aproximadamente, 6 horas de dissolução. Permeabilidade a amostra, em média, foi de $2,6 \times 10^{-05}$ cm/s.

Comportamentos semelhantes são encontrados no trabalho de Castellanza e Nova (2004) que tem investigado a degradação química quanto a interação rocha-fluido em geomateriais cimentados.

4 CONCLUSÕES

A interação de um fluido reativo com a rocha afeta seu comportamento mecânico. Para entender os efeitos mecânicos devido a dissolução química, rochas artificiais carbonáticas brandas foram atacadas por uma solução ácida, através de um ensaio edométrico modificado.

A partir dos ensaios edométricos foi possível constatar que quando o processo de dissolução inicia, mantendo-se o carregamento constante, ocorre um aumento da tensão horizontal e uma deformação volumétrica de 12%. Assim como, também foi verificado que o processo de dissolução dos minerais provocou um aumento da porosidade de 46,4%.

Durante o processo de dissolução da rocha carbonática sintética foi possível observar a influência da interação química exercida pelo fluido ácido, influenciando seu comportamento mecânico. Este comportamento será melhor avaliado a partir dos estudos da resistência da amostra após o ataque químico.

Desta forma, de acordo com os resultados apresentados, observa-se que os meios porosos cimentados apresentam um comportamento de “enfraquecimento” diante da degradação química da amostra, efeito da interação rocha-fluido, tendo como consequência os efeitos geomecânicos, compactação e subsidência.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

- Ahr, W. M. (2008) Summary: *Geology of Carbonate Reservoirs*, in *Geology of Carbonate Reservoirs: The Identification, Description, and Characterization of Hydrocarbon Reservoirs in Carbonate Rocks*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. doi: 10.1002/9780470370650.ch8
- Rötting, T.S., Luquot, L., Carrera, J., Casalinuovo, D.J., 2015. *Changes in porosity, permeability, water retention curve and reactive surface area during carbonate rock dissolution*. Chemical Geology, 403: 86-98.
- Lins, C.M.M.S., Melo, L.M.P., Oliveira, A.D., Firmo, A.L.B., Galindo, K.B.T. (2012). *Analysis of the carbon dioxide (CO₂) injection on carbonate rocks*. Cientec. V4 (2): 84-91.
- Fernandez-Merodo, J., R. Castellanza, M. Mabssout, M. Pastor, R. Nova, & M. Parma (2007). *Coupling transport of chemical species and damage of bonded geomaterials*. Comp. & Geotechnics 34(4). 200-215.
- Gomes, I. F. (2009) *Implementação em elementos finitos das equações de pressão e saturação para simulação de fluxo bifásico em reservatórios de petróleo deformáveis*. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, Brasil, 188 p.
- Ciantia, M. e Hueckel, T., (2013). *Weathering of submerged stressed calcarenites: chemo-mechanical coupling mechanisms*. Géotechnique, 10.1680/geot.SIO13.P.024, 768-785.
- Ciantia, M., Castellanza, R., Merodo, J., e Hueckel, T., (2014). *A multiscale approach for evaluating the failure condition of calcarenite structures subject to environmental loads*. Geomechanics from Micro to Macro 939-944.
- Ciantia, M., Di Prisco, C. e Castellanza, R., (2013). *Chemo-mechanical weathering of calcarenites*. Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics 541-548.
- Castellanza, R., Gerolymatou, E., e Nova, R. (2009). *Experimental Observations and Modeling of Compaction Bands in Oedometric Tests on High Porosity Rocks*. Strain, 10, 1111/j.1475-1305.2008.00578.x, 410-423.
- Spadini, A. R.; Marçal, R. A.; *Porosidade em reservatórios carbonáticos: algumas considerações*. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, v. 13, n. 1, p. 129-138, nov. 2004/maio 2005.
- Castellanza R, Nova R (2004) *Oedometric tests on artificially weathered carbonatic soft rocks*. J Geotech Geoenviron Eng ASCE 130(7):728–739
- Lins, C.M.M.S, (2014) *Desenvolvimento de uma célula edométrica para estudo da evolução da tensão horizontal durante a dissolução química*. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, Brasil.
- Guimarães L.J.N., Gens A, Sanchez M, Olivella S. (2006). *THM and reactive transport analysis of expansive clay barrier in radioactive waste isolation*.

Communications in Numerical Methods in Engineering; 22(8):849–859. DOI: 10.1002/cnm.852.
NBR –ABNT-6508/84. *Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8mm – Determinação da Massa Específica.*
NBR- ANBT- 12025/12. *Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos- Método de ensaio.*