

10º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

EFEITO DA DISSOLUÇÃO DOS MINERAIS NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE UMA ROCHA CARBONÁTICA SINTÉTICA

AUTORES:

Katia Botelho Torres Galindo¹; Cecília Mota Silva Lins²; Analice Lima¹; Leonardo José do Nascimento Guimarães¹; Nayara Torres Belfort¹ Samuel França Amorim²

INSTITUIÇÃO:

¹Universidade Federal de Pernambuco; ²Universidade Federal Rural de Pernambuco

EFEITO DA DISSOLUÇÃO DOS MINERAIS NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE UMA ROCHA CARBONÁTICA SINTÉTICA

Abstract

The main motivation of this research was the development of experimental studies to evaluate the changes in stress and strain of a synthetic carbonatic rock, using a modified oedometric cell. Therefore, in this research it is presented laboratorial tests carried out with a cemented carbonatic rock artificially produced. In this work the influence of different fluids was evaluated, one of them was the water and the other was the acetic acid. It was verified that there was a linear evolution performed for the horizontal stress, while a volumetric deformation of 1.9% and 4% was developed at the end of the dissolution test with the water and the acetic acid respectively. It was also observed that the rock porosity increased by 46.4%, which may cause a chemical induced compaction of the reservoir when subjected to fluid injection, and changing of the initial rock characteristics.

Introdução

Rochas carbonáticas são um tipo de rocha sedimentar de origem química e bioquímica composta basicamente por minerais carbonáticos, constituídos principalmente por calcários e dolomitas (carbonatos de cálcio e magnésio). Reservatórios carbonáticos exerceram um papel relevante na indústria do petróleo por conterem elevados volumes de óleo e gás natural em muitas bacias sedimentares ao redor do mundo, e ainda por sua maturidade exploratória dos reservatórios mais rasos e a necessidade da exploração de reservatórios mais profundos (RANGEL, 2002).

Neste sentido, a integridade dos materiais que compõem o sistema geológico desses reservatórios deve ser estudada, pois, quando esses materiais são expostos a fluidos de composição diferente daquele originalmente presente nos poros das rochas, seja pela infiltração da água da chuva e ou/ água do mar (CIANTIA et al., 2015) até pela injeção e/ou extração de fluidos em formações geológicas, tem-se ao menos o deslocamento dos fluidos contidos nos poros dessa formação, podendo ser miscível ou imiscível no fluido originalmente existente. Todos os processos envolvidos dependem principalmente da reatividade do fluido nas condições de temperatura e pressão às quais está submetido, pode induzir a uma complexa interação de fluxo multifásico (LINS et al., 2013; GALINDO et al., 2019)

Devido aos carbonatos serem instáveis e quimicamente reativos, processos de cimentação e dissolução são bastante comuns nessas rochas, levando à remoção de conchas e outros fragmentos em sua estrutura além do aumento de porosidade. Posteriormente estes vazios podem ser preenchidos por cimentação (MARTÍNEZ, 2007), apresentando características geomorfológicas heterogêneas e complexas. As condições para ocorrer a dissolução nas rochas incluem uma combinação de diferentes processos (exemplo: ciclos de maré, mudanças de temperatura sazonais, mudança da fauna e flora marinha, armazenamento geológico em plataformas de petróleo e etc., afetam a acidez da água).

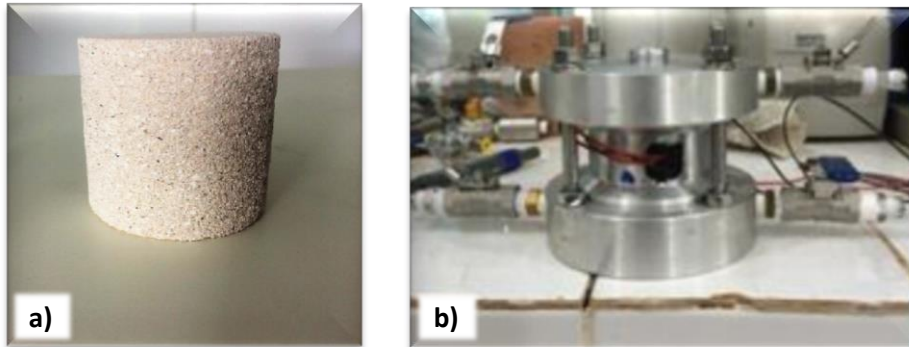
Desta forma, a principal motivação desta pesquisa foi o desenvolvimento de estudos experimentais para avaliar as alterações nas tensões e deformações de rochas carbonáticas sintéticas submetidas a interação com água e com um fluido ácido. Para isso, os ensaios foram realizados através de uma célula edométrica com medida de tensão horizontal, com a finalidade de compreender as alterações que podem ocorrer e alterar as características iniciais da rocha.

Para essa investigação do comportamento de rochas carbonáticas, as amostras utilizadas como objeto de estudo foram rochas sintéticas devido ao melhor controle de suas propriedades e características.

Metodologia

Os protocolos experimentais realizados nesta pesquisa, visam representar e entender as variações nas tensões e deformações de uma rocha carbonática sintética (Figura 1) a partir do ensaio edométrico submetido a um fluxo ácido.

Figura 1: (a) Rocha carbonática sintética; (b) Célula edométrica. Fonte: GALINDO et al., 2019.



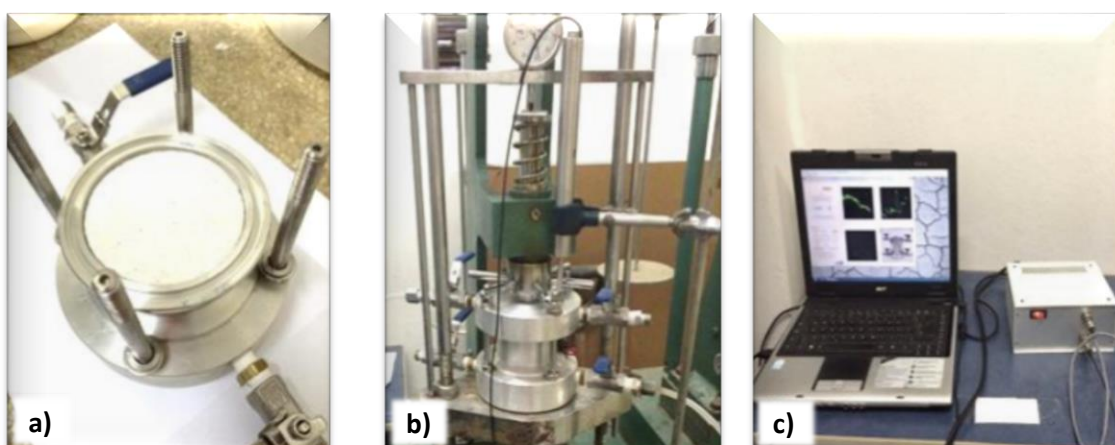
2.1 Caracterização Física

Para o estudo da rocha sintética foram realizadas as caracterizações das propriedades físicas como: (a) Determinação da porosidade, índice de vazios e peso específico dos grãos e, (b) Características Mineralógicas das amostras antes e após a dissolução dos minerais.

2.2 Ensaio de Dissolução

Esta etapa foi realizada com a intenção de se avaliar o comportamento das amostras sintéticas durante a dissolução utilizando uma célula edométrica modificada. Nesta etapa dos ensaios, a amostra de rocha foi colocada na célula, e o conjunto colocado na prensa de adensamento, ajustando o LVDT (medições de deslocamentos verticais), e juntamente com os extensômetros foram conectados ao computador para leitura no programa de aquisição de dados, como mostra a Figura 2 (a-c).

Figura 2: a) Montagem da amostra na célula edométrica; b) Célula edométrica na prensa de adensamento e; c) O extensômetros e LVDT conectados ao programa de aquisição de dados



Em seguida, foram aplicadas -no topo da amostra cargas verticais, de 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa e 150 kPa, com um espaço de tempo de 5 minutos entre cada carregamento para a estabilização das tensões na amostra. Após aplicada a tensão vertical indicada para cada ensaio, foi aplicada uma pressão de líquido constante de 2 kPa aplicada na base da amostra. Nessa etapa do ensaio, para a avaliação da

dissolução da rocha pelo ácido, foi utilizada uma solução de ácido acético com concentração de 10%. Essa etapa da dissolução, teve duração de 30 min de percolação do fluido numa direção ascendente para ambos fluidos avaliados, água e ácido acético.

Durante todo o procedimento a condutividade elétrica e o pH foram monitorados através de um condutivímetro da marca DIGMED modelo DM-32 e de um pHmetro de mesma marca e modelo DM-22, assim como foi determinado o coeficiente de permeabilidade através percolação do fluido. O monitoramento da permeabilidade foi realizado através da determinação da velocidade de entrada e saída da percolação do fluido. Também, as deformações verticais e horizontais da amostra foram determinadas a partir dos extensômetros (LVDT e strain gauges) ligados ao programa de aquisição de dados.

3. Resultados e Discussão

3.1 Procedimento de avaliação das tensões e deformações da dissolução dos minerais

Na Figura 3, observa-se o comportamento das amostras referente a tensão horizontal efetiva e a evolução da deformação volumétrica ao longo do tempo, para as cargas verticais de 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa e 150 kPa. De acordo com os resultados obtidos, é possível observar que a tensão horizontal efetiva na fase de carregamento não apresenta alterações expressivas. Porém, na fase da dissolução, a tensão horizontal efetiva aumenta, e após um tempo fica constante durante o ensaio, sendo mais expressivas/intensas (mudar esse termo – em todas 4 situações esse aumento é evidente) para as cargas axiais de valores maiores (100 e 150 kPa).

Mesmo sendo um ensaio de duração curta, o comportamento observado na Figura 3 foi coerente com os estudos de dissolução de rochas calcárias brandas de Castellaza e Nova (2004), onde foi verificado que à medida que a rocha é dissolvida, a tensão horizontal efetiva aumenta. Quanto à deformação volumétrica (Figura 4), também se observa que na fase de carregamento não há alterações significativas, porém quando se iniciou a fase de dissolução dos minerais, houve uma deformação da amostra de aproximadamente 0,30%, 0,90%, 2,93%, 3,90% para as cargas verticais aplicadas de 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa e 150 kPa respectivamente. Constatando-se assim que durante a dissolução, tem-se a perda de massa da amostra devido à dissolução dos minerais de calcita existentes na amostra de rocha sintética.

Figura 3: Valores da Tensão Horizontal Efetiva da Dissolução com carregamento vertical de a) 25 kPa; b) 50 kPa; c) 100 kPa e d) 150 kPa.

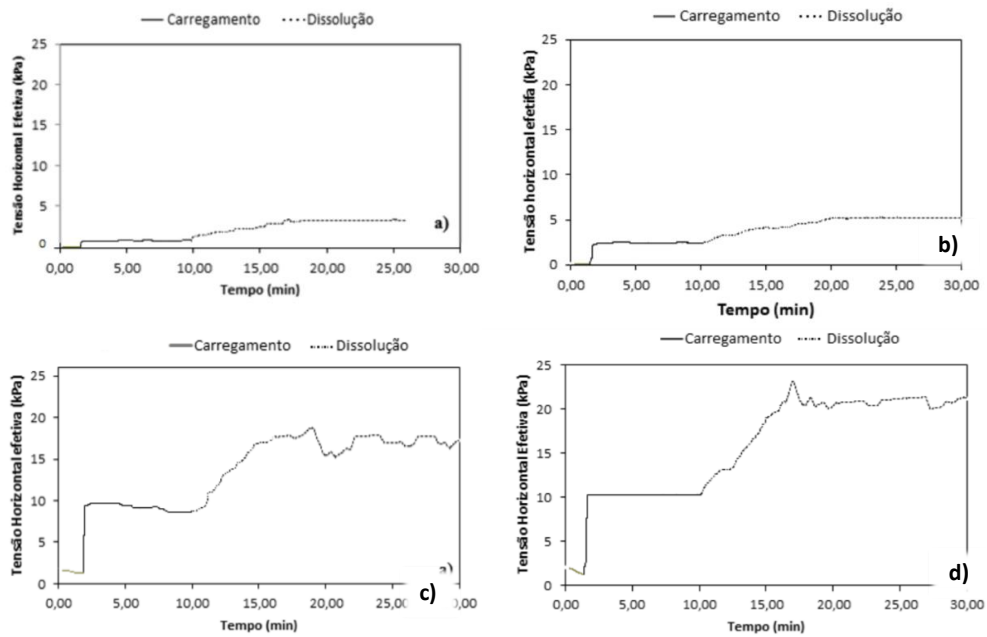
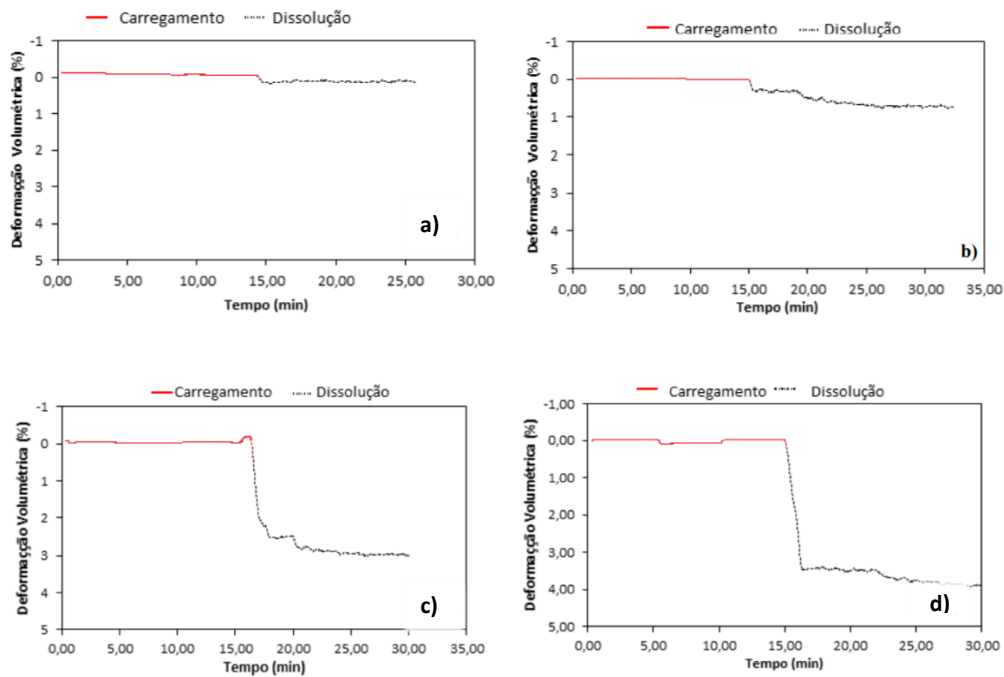
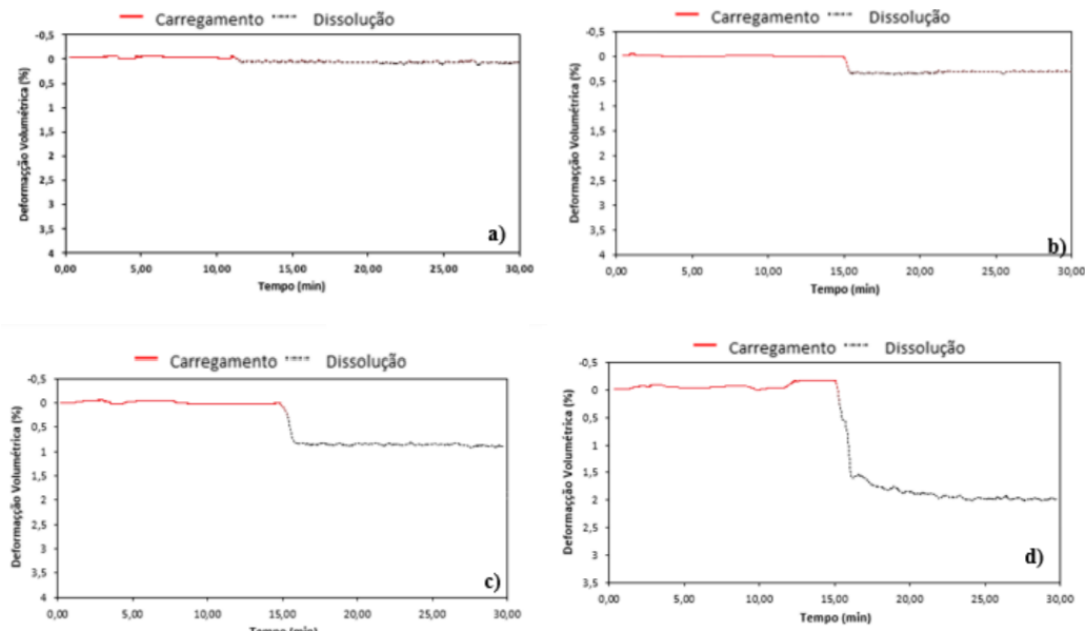


Figura 4: Valores da Deformação Volumétrica da Dissolução com carregamento vertical de a) 25 kPa; b) 50 kPa; c) 100 kPa e d) 150 kPa.



Em seguida, avaliando o comportamento da rocha diante da dissolução através do fluxo de água destilada, a fim de analisar a diferença da deformação volumétrica sem o ataque ácido. Na Figura 5 observa-se que o comportamento da rocha foi semelhante ao da Figura 3, porém, em termos de valores absolutos, as deformações volumétricas foram de 0,19%, 0,35%, 0,70%, 1,80%, valores inferiores aos observados para o cenário com fluxo de fluido ácido. Isso é explicado pelo fato de a água destilada (pH = 7,0) não influenciar tanto na dissolução dos minerais como o ácido.

Figura 5: Deformação volumétrica da dissolução com água. a) Carregamento de 25 kPa; b) Carregamento de 50 KPa; c) Carregamento de 100 kPa e d) Carreamento de 150 kPa.



3.2 Análise das alterações nas características físicas das amostras antes e após dissolução

Na Tabela 1 estão apresentados os resultados da porosidade (n), índice de vazios (e) e densidade das partículas (γ_s) antes e após a dissolução dos minerais.

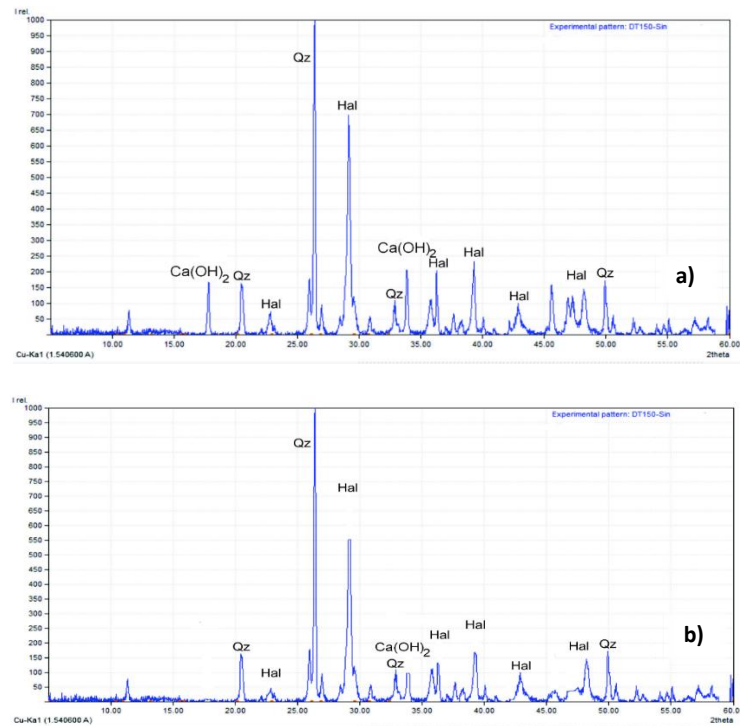
Tabela 1: Valores das características físicas das amostras antes e após dissolução com o fluxo ácido

Amostra	m (g)	$\gamma_s = m/v$ (g/cm ³)	e	$n(\%)$
Pré-ensaio de dissolução	256,13	1,653	0,577	35,78
Pós-ensaio dissolução Parcial	242,57	1,622	1,100	52,40

De acordo com os resultados apresentados na tabela, a porosidade das amostras, após a dissolução, aumentou cerca de 46,6%, quando comparada com a porosidade inicial. Este aumento da porosidade é esperado, por consequência da dissolução dos minerais carbonáticos do material, acarretando o aumento dos espaços vazios da amostra.

Nas análises mineralógicas foi possível identificar as variações na composição das amostras de rochas sintéticas antes e após o ensaio de dissolução dos minerais com ácido acético. Os difratogramas obtidos pela difração de Raios-X estão apresentados nas Figuras 6(a-b) e 7 (a-b).

Figura 6: Difratogramas de raios X dos principais minerais da amostra de rocha sintética: A) antes e B) após a dissolução. Onde Ca (OH) 2 é cálcio Hidróxido, Hal é Halimeda e Qz é areia com alta porcentagem de quartzo.

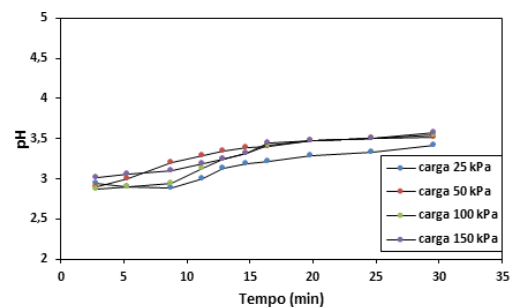
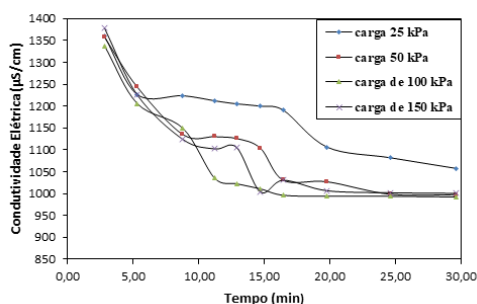


Observando a Figura 6 b, pode-se analisar nos difratogramas do material após a dissolução que os picos dissolvidos são os da calcita da halimeda e o do Ca(OH)_2 , pois o quartzo, o feldspato e outros minerais de silicatos que estão presentes na areia, são minerais resistentes e por isso não são afetados pela dissolução com ácido no ensaio. Conclui-se então que as concentrações de Ca(OH)_2 e halimeda diminuem cerca de 5% e 1% respectivamente da sua concentração, com isso a amostra perde cerca de 2% da sua massa total.

Durante todo o ensaio de dissolução foram medidos condutividade elétrica e pH do fluido de saída. A Figura 7 a apresenta os resultados do comportamento da condutividade elétrica durante o tempo do ensaio de dissolução, para as diferentes cargas aplicadas para o cenário com fluido de injeção ácido.

Também foi verificada a dissolução da mineral calcita na solução, devido ao aumento nos valores do pH, sendo influenciado também pelo aumento das tensões verticais, como observado na Figura 7b. Uma vez que o fluxo do ácido é mantido constante, como a dissolução prosegue com o tempo, os íons de H^+ são consumidos por reação, aumentando assim o valor do pH da solução e diminuindo os valores da condutividade elétrica. Se observa que os valores são mais evidentes quanto maior a carga vertical aplicada.

Figura 7: (a) Evolução da condutividade elétrica; (b) Valores de saída do pH do fluido das amostras da dissolução com fluido ácido para cargas de 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa e 150 kPa



Conclusões

A dissolução das amostras de rocha carbonática sintética com uma solução de ácido acético acarretou em modificações nas propriedades físicas e geomecânicas do meio. Nos experimentos, durante a dissolução dos minerais, os valores da tensão horizontal e deformação volumétrica aumentam em consequência da dissolução das ligações entre os grãos de calcita, bem como a diminuição desses grãos.

O aumento da tensão horizontal e deformação volumétrica são refletidas nas medições durante os ensaios das variações dos valores de entrada e saída nos valores do pH, e com o aumento da porosidade de cerca de 46,6%.

Este processo pode ocasionar o fenômeno de compactação induzida, intemperismo pelo ataque químico e a redistribuição da tensão.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro fornecido pelo projeto de colaboração PETROBRAS, REDE GEOMEC e Energi Simulation.

Referências Bibliográficas

1. Ciantia MO, Castellanza R, Crosta GB, Hueckel T (2014) Mineral suspension and dissolution: their role in weakening of inundated soft carbonatic rocks. *Eng Geol*
2. FEDRIZZI, R. M. et al., (2018). Artificial carbonate rocks: Synthesis and petrophysical characterization. UENF, BRAZIL.
3. MERODO, F. J., et al., (2007). Coupling transport of chemical species and damage of bonded geomaterials. *Comp. & Geotechnics* 34(4). 200-215.
4. GALINDO, K. B. T. (2016). Comportamento hidro-mecânico de rochas carbonáticas sintéticas submetidas a injeção de um fluido reativo. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, Brasil.
5. GALINDO, K. B. T. (2018). Análise das características geomecânicas e geoquímicas de rochas carbonáticas sintéticas quando submetidas a um fluido reativo. Exame de Qualificação de Doutorado. UFPE.
6. GALINDO, K. B. T. et al., (2019). Hydro-Mechanic Behavior of Synthetic Carbonate Rocks Subjected to Injection of a Reactive Fluid. American Rock Mechanics Association. 53rd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 23-26 June, New York.
7. 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.
8. MELO, L. M. P. 2012. *Análise numérico-experimental de rochas carbonáticas sintéticas submetidas à injeção de um fluido reativo*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, Brasil.
9. VIEIRA, K. N. ; JESUS, L. L. ; LIMA, A. ; Guimaraes, L.J.N. (2017). Análise De Dissolução Ácida De Rocha Carbonática Artificial Cimentada Com Cp V – Ari. In: *9º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás.*, 2017, Maceió, 2017.