

ROCHAS CARBONÁTICAS ARTIFICIAIS: SÍNTESE E ANÁLISE MECÂNICA

MARIA CAMILLA FARIAS CABRAL DE MIRANDA

Mestrando do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFPE, camilla.farias7@gmail.com;

LEONARDO JOSÉ DO NASCIMENTO GUIMARÃES

Professor pelo Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFPE, leonardo.guimaraes@ufpe.br;

ANNY VIRGINIA SOUZA DE LIMA

Mestrando do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFPE, annyvirginias@gmail.com;

RESUMO

O estudo das propriedades das rochas carbonáticas é de grande importância, porque estão associadas a reservas significativas de petróleo e gás em todo o mundo. Os reservatórios carbonáticos se revigoraram no Brasil após a descoberta do pré-sal, dessa forma o objetivo da síntese de rochas carbonáticas em laboratório é simular a matriz natural da rocha carbonática em relação aos principais fatores envolvidos no processo de litificação, como tamanho e formato dos grãos, dimensões da amostra, pressão aplicada na compactação, entre outros. Com isso, permite-se que a fabricação de corpo-de-prova reproduza futuros ensaios em condições extremas, substituindo alguns obstáculos de obter amostras naturais de alto custo. A utilização de amostras sintéticas origina amostras mais uniformes, permitindo uma maior repetibilidade dos ensaios. Foram feitas análise de caracterização mecânica da rocha carbonática sintética, com valor médio de resistência a compressão simples na ordem de 35 Mpa e classificada como uma rocha pouco resistente. Neste trabalho, as construções de amostras carbonáticas sintéticas foram feitas com o pó de halimeda, resina epóxi e endurecedor, com o objetivo de caracterizar essas amostras e seus efeitos mecânicos, possibilitando um melhor entendimento da relação entre suas propriedades físicas.

Palavras-chave: Rocha carbonática sintética, reservatório de petróleo, resistência mecânica.

INTRODUÇÃO

Os carbonatos são rochas sedimentares, de origem clástico, química ou bioquímica, composta principalmente por Calcita (CaCO_3), Dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) e Aragonita (CaCO_3), além de minerais secundários como anidrita, gesso, siderita, quartzo, argilominerais, pirita, óxidos e sulfatos (Arh et al., 2005). As rochas carbonáticas têm grande importância para a indústria petrolífera mundial, sendo responsáveis por aproximadamente 50% da produção total de hidrocarbonetos no mundo (Xu e Payne, 2009). Essas rochas carbonáticas constituem os reservatórios dos maiores campos petrolíferos do mundo, incluindo os localizados no Pré-sal brasileiro que, no que diz respeito ao aumento no potencial dessas reservas, possibilita um crescimento na economia do país (Robert; Crowe, 2000). Estas rochas são depositadas naturalmente em ambientes marinhos ou continentais de águas claras, cálidas e rasas, também podem se formar pela erosão ou lixiviação e posterior transporte do material carbonático de zonas de dissolução a zonas de precipitação que leva à sedimentação destas rochas em camadas paralelas e horizontais. (Acocella & Turrini, 2010). Contudo, os carbonatos abrangem uma variada gama de fácies deposicionais e um complexo meio poroso, no qual é necessária uma ampla compreensão de suas características petrofísicas.

As amostras naturais são necessárias para vários tipos de ensaios, onde são feitos testes em pesquisa de engenharia de petróleo como avaliação de desempenho de inundação de núcleo para técnicas de Recuperação Avançada de Petróleo (EOR) e investigações de danos de formação (Torsater et al., 2013; Sacramento et al., 2015) que podem alterar suas características originais, ensaios geomecânicos (Chatterjee e Mukhopadhyay, 2002) que podem ser destrutivos e testar novas metodologias para caracterização de reservatórios. Como as operações de testemunhagem têm alto custo, a síntese de rochas carbonáticas artificiais em ambiente de laboratório permite o ingresso a amostras de rochas com características pré-determinadas análogas às rochas naturais, porém com custo relativamente mais baixo. Além do que, é complicado adquirir amostras representativas de carbonato e quantificar suas estruturas de poros devido à variedade de tipos de poros complexos e uma alta heterogeneidade, o que torna árduo para os pesquisadores atingirem uma concordância sobre suas descobertas.

Em contrapartida, a fabricação de modelos físicos com sistema poroso conhecido permite aos pesquisadores simular matrizes naturais de calcário

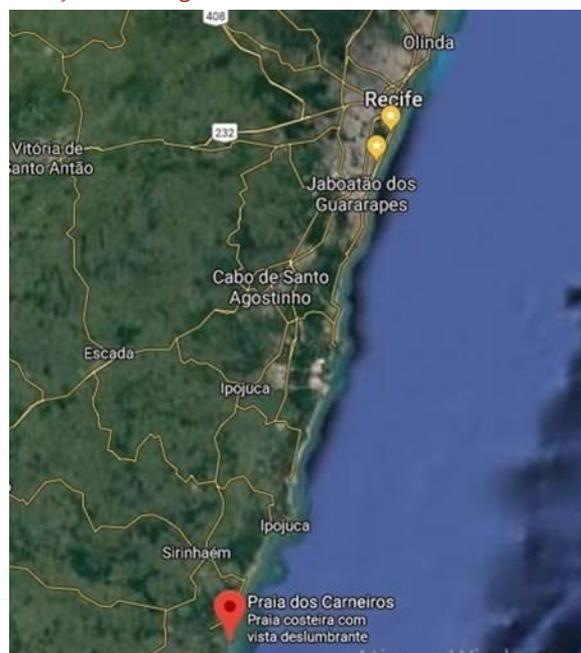
em relação aos principais fatores de litificação como tamanho e formato do grão, concentração de materiais cimentantes e pressão de compressão. Desta maneira, além da questão relacionada à disponibilidade das amostras, o principal objetivo de sintetizar carbonato em ambiente laboratorial no contexto desse trabalho é a possibilidade de um melhor controle quanto à repetibilidade das amostras em relação a sua resistência mecânica.

Neste trabalho, rochas carbonáticas foram feitas usando uma combinação de pó de Halimeda, resina epóxi e endurecedor, nossas amostras artificiais delinearão reproduzir carbonatos com resistência a compressão simples na média de 35 Mpa a classificando como rocha pouco resistente.

METODOLOGIA

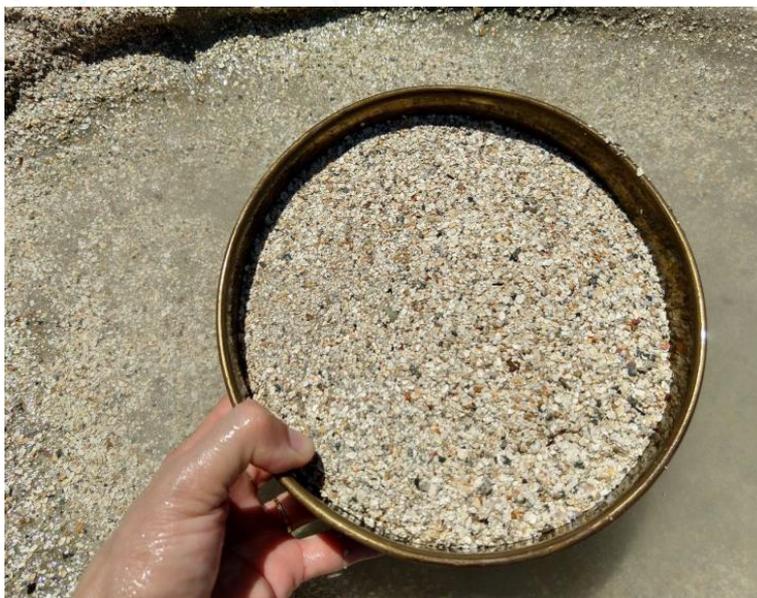
Os materiais utilizados para produzir rochas sintéticas foram: pó de Halimeda, resina epóxi e endurecedor. A coleta dos sedimentos carbonáticos que foram utilizados para preparação da rocha sintética foram feitas na Praia de Carneiros (PE), localizada no município de Tamandaré, cerca de 100 km de Recife. A Figura 1 mostra o mapa da localização das regiões onde foram realizadas as coletas de sedimentos carbonáticos (halimeda).

Figura 1 - Localizações das regiões onde foram realizadas as coletas de halimeda



Os sedimentos carbonáticos encontrados nessa praia apresentaram pedaços e fragmentos calcários de algas marinhas, mais conhecidos como halimeda, fonte de calcita e alternativa ideal para a produção de uma rocha sintética com características carbonáticas. A figura 2 mostra a forma que a halimeda foi coletada na região apresentada.

Figura 2 – Halimeda coletada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a coleta, foi feita a limpeza da Halimeda com a catagem dos resíduos que veio presente nos fragmentos, conforme figura 3. Em seguida, inicia-se o processo de lavagem com água destilada e deixada em imersão na água quente por 30 minutos, até serem colocados na estufa à 65° C por um tempo mínimo de 48h. Com a halimeda seca mostrada na figura 4, é feita a moagem em moinho vibratório de disco orbital MA 365 apresentado na figura 5. O material é processado cerca de 7 minutos até obter granulometria expressamente inferior à da halimeda em estado inicial. Em seguida, separa-se o material da fração passante da peneira 0,42 mm (NBR 7181/88), peneira apresentada na figura 6, sendo esse material pronto para ser utilizado na preparação das amostras sintéticas.

Figura 3 - Resíduos da Halimeda



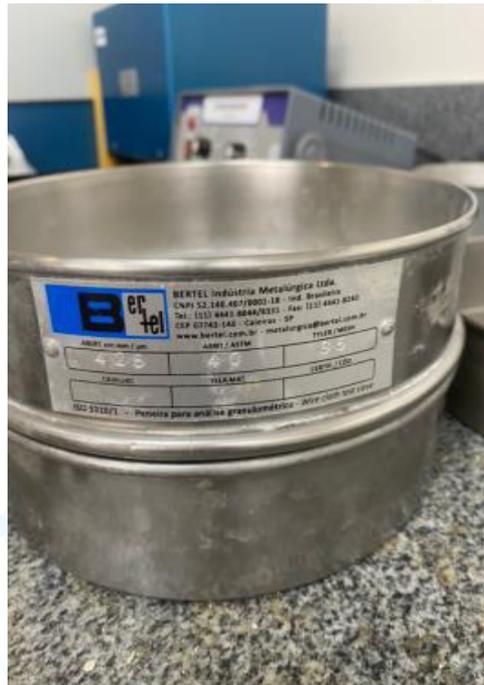
Figura 4 – Halimeda após lavagem



Figura 4 - Moinho



Figura 5- Peneira



Os corpos de prova preparados para ensaios foram compostos de Halimeda, resina epóxi e endurecedor, na pesagem de 162,5 g de Halimeda, 19,008 g de resina epóxi e 9,65 g de curador. Utilizou-se a resina tipo termorrígida epóxi transparente 2001 5kg de alta viscosidade e endurecedor 3154 da fabricante Redelease, conforme figura 7 e 8 respectivamente, com utilização em proporção 2:1 (100 % resina : 50% endurecedor) e a cura é realizada em temperatura ambiente. Segundo a fabricante Redelease (2021), o produto apresenta alta resistência química e mecânica, possui baixa contração, boa adesão, estabilidade a ciclos térmicos e impactos, boa fluidez e não libera subprodutos na sua utilização.

Figura 7 - Resina Epoxi

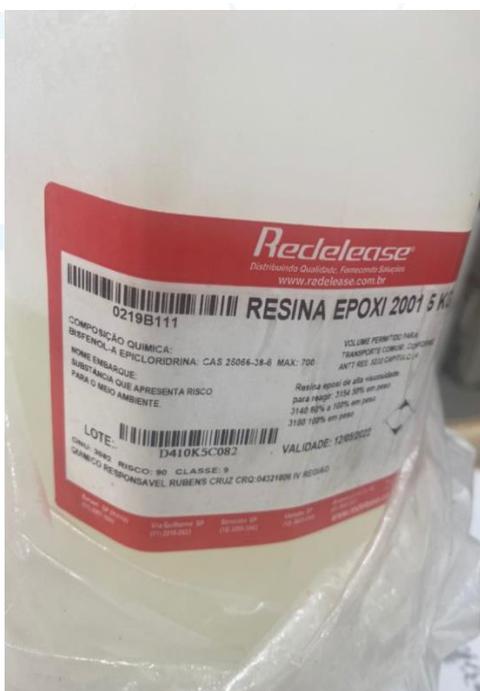
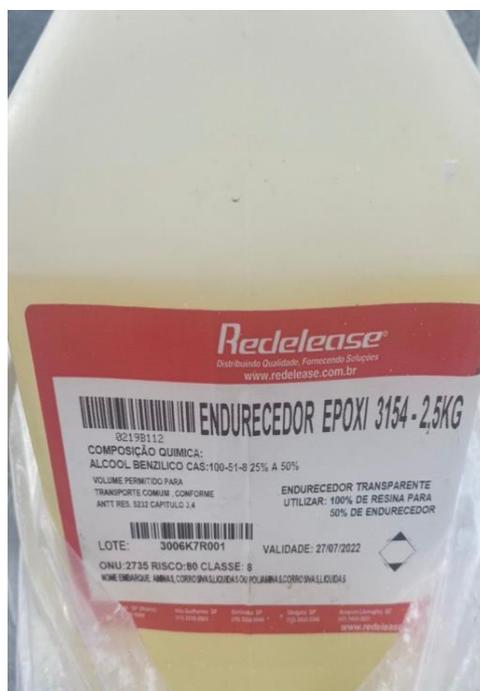


Figura 8 – Endurecedor Epoxi



Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente os materiais foram pesados em uma balança semi-analítica e logo após a pesagem foram misturados e homogeneizados o curador com a resina durante 2 minutos (figura 9), realizando movimentos circulares e evitando a formação de bolhas de ar e após a mistura homogeneizada, juntar com a massa de halimeda, com todos os materiais misturados, destorroa o material com o auxílio de uma peneira comum. O material homogeneizado com todos os componentes apresenta-se na figura 10.

Figura 9 - Mistura resina e curador



Figura 10 – Misturas Homogeneizadas



Fonte: Elaborado pelo autor

Posteriormente, o material foi depositado na célula de inox para a compactação (figura 11), onde foi realizada a compactação estática, com ajuda de uma prensa mecânica. A compactação dinâmica foi dividida em três camadas, onde em cada camada foram aplicados 26 golpes com a energia do prócton normal, atendendo a norma NBR 7182. O valor estabelecido como critério para altura da amostra compactada foi de oito centímetros, com um volume resultante de aproximadamente $100,48 \text{ cm}^3$ em cada corpo de prova.

Figura 11 – Material depositado na célula



Fonte: Elaborado pelo autor.

Utilizou-se o processo de compactação para consolidação da amostra, o material foi moldado numa prensa de CBR da marca Via Test (figura 12), com anel dinamométrico com capacidade máxima de 5.000 kg para consolidar num intervalo de 5 minutos, até que atinja uma altura de oito centímetros, padrão da amostra.

Figura 12 – Prensa CBR para compactação da amostra



Fonte: Elaborado pelo autor

Logo após a compactação, a amostra foi extraída do molde com o auxílio de um extrator mecânico. Posteriormente a amostra foi levada à estufa a uma temperatura de 60 °C por 24 horas (Figura 13), essa temperatura é indicada pelo fabricante para reação do epóxi, pois acima dessa temperatura é afirmado que o material perde a resistência. Por fim, a amostra sintética está pronta para futuros ensaios a serem realizados.

Figura 13 – Estufa para secagem da amostra



Fonte: Elaborado pelo autor

Análise da Resistência da Rocha

As análises mecânicas foram realizadas através do ensaio de compressão simples com a finalidade de obter a resistência à compressão simples, usualmente chamada de UCS (*Uniaxial Compressive Strength*) ou a resistência de pico das amostras de rocha. Nesse ensaio de rochas foram submetidas a uma tensão vertical (σ_1) crescente, à velocidade constante, sem tensão confinante ($\sigma_3 = 0$), distribuída de modo uniforme em toda a seção transversal do corpo de prova.

Para o procedimento deste ensaio, foi utilizada uma prensa servocontrolada instron modelo CCE1MN com anel dinamométrico com capacidade de 1MN e defletômetro para medir o deslocamento do anel e, assim, determinar a tensão máxima. Para isso, esse anel foi previamente calibrado com pesos predeterminados, para que cada deslocamento realizado pelo anel fosse correspondente a uma carga. A prensa tem um sistema controlado por um motor que sobe uma plataforma à velocidade controlada. A amostra fica entre esta plataforma localizada na base da prensa e o anel dinamométrico.

À medida que a plataforma sobe a amostra vai sendo comprimida pelo anel dinamométrico até ocorrer a sua ruptura. Durante os ensaios, os deslocamentos verticais foram medidos para determinar a deformação vertical

da amostra. A Figura 14 mostra a prensa para o sistema de compressão de realização dos ensaios. A cada 10 mm deslocado temos o valor relacionado à tensão.

A mineralogia, porosidade, densidade do material, geometria do corpo e a prensa utilizada nos ensaios são fatores que podem influenciar na determinação da resistência das rochas. O gráfico de tensão *versus* deformação geralmente é utilizado para mostrar o comportamento típico das rochas, até a carga de ruptura do material.

Para obtenção do UCS, foram preparadas oito amostras de rochas carbonáticas e realizados os ensaios individuais de cada amostra utilizando o sistema de compressão já mostrado.

Iniciado o ensaio, obteve-se a leitura dos valores dos dois extensômetros (de carga e de deslocamento) até que se verificasse a ruptura do corpo de prova, caracterizada pela queda no valor do extensômetro do anel dinamométrico, ou seja, assim que houve a queda do valor do extensômetro do anel foi confirmada a ruptura do corpo de prova.

Figura 14 – Sistema utilizado para ensaio de compressão simples



Com base nas curvas geradas pelos dados de tensão-deformação, é possível calcular o módulo de elasticidade médio, correspondente ao declive

da secante entre a origem e o ponto de rotura, de acordo com a seguinte relação:

$$E = \frac{\sigma_{axial}}{\epsilon_{axial}}$$

onde E é a constante de proporcionalidade conhecida como módulo de elasticidade, σ_{axial} é a tensão axial aplicada e ϵ_{axial} é a deformação na mesma direção da força aplicada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para obter o valor de UCS da rocha carbonática sintética, foram preparadas oito amostras e realizou-se uma média dos valores obtidos. A tabela 1 mostra os valores médios de cada amostra associada a UCS. Os dados para os valores de tensão foram calculados até o momento em que as amostras apresentam ruptura.

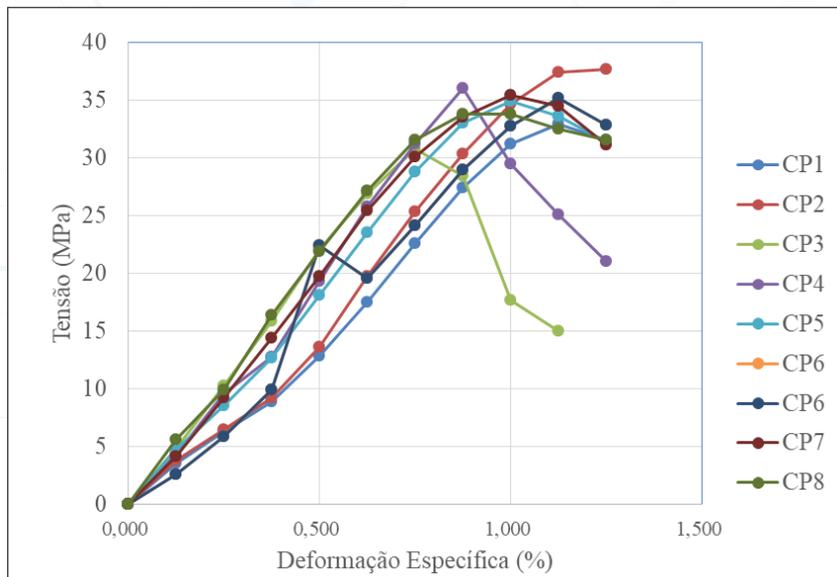
Tabela 1 – Valores médios das tensões de cada corpo de prova

Amostras	Tensão desvio (Mpa)
CP1	32,86
CP2	37,63
CP3	30,77
CP4	36,00
CP5	34,89
CP6	35,18
CP7	35,40
CP8	33,79

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 15 apresenta a evolução da tensão *versus* deformação das amostras de rochas quando submetidas à compressão axial.

Figura 15 - Gráfico do comportamento da tensão *versus* deformação das rochas carbonáticas submetidas ao ensaio de tensão axial.



Fonte: Elaborado pelo autor

O valor de UCS médio calculado foi de aproximadamente 35 MPa, valor esse que é considerado segundo a literatura como rocha pouco resistente. Onde as diferenças de resposta mecânica entre uma rocha dura e uma rocha branda mostram que a pequena deformabilidade do primeiro tipo está associada a uma rotura súbita com uma resistência residual praticamente nula. As rochas brandas são as que exibem maior deformabilidade, sobretudo no início do carregamento.

Tabela 2 – Grau de resistência à compressão simples

Rocha	Resistência (kgf/cm ²)
Muito resistente	>1200
Resistente	1200 – 600
Pouco resistente	600-300
Branda	300-100
Muito branda	<100

Contudo, o valor de resistência da rocha a classifica como uma rocha carbonática pouco resistente, estando de acordo com o trabalho proposto, sendo esse valor considerado favorável para uma rocha sintética.

A seguir na imagem 16 são mostradas as condições que as amostra sintéticas tornaram-se após o ensaio realizado.

Figura 16 – Amostras rompidas após ensaio de compressão simples



Fonte: Elaborado pelo autor

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O principal objetivo do presente artigo foi o processo de construção de rochas carbonáticas sintéticas, para um entendimento mais abrangente do processo litificação, como tamanho e formato dos grãos, dimensões da amostra, pressão aplicada na compactação, etc. E também a avaliação dos efeitos mecânicos originado pelo ensaio de compressão simples na rocha sintética.

Com base nisso e nos resultados apresentados neste artigo, foi possível concluir que as oito amostras sintéticas construídas foram pertinentes ao propósito da fundamentação teórica mostrada onde possibilitou um melhor entendimento da conexão entre suas propriedades físicas.

A metodologia proposta de construção das amostras artificiais se mostrou propícia, resultando em um corpo de prova com características de rocha carbonática e a repetibilidade alcançada foi satisfatória, permitindo o uso de amostras sintéticas para o ensaio de compressão simples analisando sua resistência mecânica como fator principal, e a partir disso é sugerido outros

ensaios mais complexos em rochas sintéticas para análise de diferentes características.

Na análise geomecânica, a resistência média à compressão axial (UCS) encontrada foi de, aproximadamente, 35 MPa, valor esse que a classificou como pouco resistente, todavia, ainda dentro da classificação carbonática.

O conjunto de verificações atribuiu conhecimento aos acontecimentos decorrentes no processo de resistência de rochas carbonáticas sintéticas, agregando informação à recente tendência da utilização de rochas sintéticas nos estudos relacionados à indústria petrolífera, possibilitando que a fabricação de amostras sintéticas reprisesm futuros ensaios em condições extremas, substituindo algumas barreiras de obter amostras naturais de custo elevado.

REFERÊNCIAS

ACOCELLA, A.; TURRINI, D. Formation, appearance and characterization of travertine: in Sieneese travertine. Alinea, Florence, 2010, 303p.

AHR, W. M.; ALLEN, D.; BOYD A.; BACHMAN, H. N.; CLERKE, E. A.; SMITHSON, T.; GZARA, K.; HASSALL, J.; MURTY, C.; ZUBARI, H.; RAMAMOORTHY, R. Confronting the carbonate conundrum. Schlumberger Oil field, Rev. p. 18 – 29, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 1988.

CHATTERJEE, R., MUKHOPADHYAY, M. Petrophysical and geomechanical properties of rocks from the oilfields of the Krishna-Godavari and Cauvery Basins, India. *Bull Eng Geol Environ* **61**, 169–178 (2002).

FEDRIZZI, R. M.; CEIA, M.; MISSÁGIA, R. Synthesis and Physical Characterization of Artificial Carbonate Rocks. In: 2014 SEG Annual Meeting. Society of Exploration Geophysicists, 2014.

MELO, L. M. P. Análise Numérico-experimental de Rochas Carbonáticas Sintéticas Submetidas à Injeção de Um Fluido Reativo. 2012. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

OLIVEIRA, A.D. Análise as alterações físico-químicas decorrentes de ensaio de dissolução em rochas carbonáticas sintéricas. 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

ROBERT J. A.; CROWE C. W. Carbonate Acidizing Design. In: ECONOMIDES, M. J.; NOLTE, K. G. Reservoir Stimulation. John Wiley & Sons. 3. ed. Londres, UK, 2000.

SACRAMENTO, R. N., YANG, Y., YOU., Z., WALDMANN, A., MARTINS, A.L., VAZ, A. S. L., ZITHA, P. L. J., BREDIKOVETSKY, P., 2015. Deep bed and cake filtration of two-size particle suspension in porous media. Journal of Petroleum Science and Engineering. 126, 201-210. <http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2014.12.001>.

TORSATER, O., LI, S., HENDRANINGRAT, L., 2013. A Coreflood Investigation of Nanofluid Enhanced Oil Recovery in Low-Medium Permeability Berea Sandstone. SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, The Woodlands, TX. doi: 10.2118/164106-MS

XU, S., and PAYNE, M., A., 2009, "Modeling elastic properties in carbonate rocks".