

9º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



9º CONGRESSO
Brasileiro de **P&D** em
PETRÓLEO E GÁS

Maceió, AL
de 09 a 11 de novembro
2017

Realização:



TÍTULO DO TRABALHO:

ANÁLISE ESTRUTURAL E FÍSICA DE ROCHAS CARBONÁTICAS DA BACIA DO ARARIPE

AUTORES:

ÁLLEF U. BURITI (1); FRANCISCO C. C. NOGUEIRA (1); MATHEUS A. NICCHIO (1);
HENRIQUE B. M. JUVINIANO (2); JOSÉ A. SOARES (1).

INSTITUIÇÃO:

(1) Universidade Federal de Campina Grande (UFCG); (2) Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 8º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás - 9º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás - ABPG, no período de 09 a 11 de novembro de 2017, em Maceió/AL. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 9º PDPETRO.

ANÁLISE ESTRUTURAL E FÍSICA DE ROCHAS CARBONÁTICAS DAS BACIAS DO ARARIPE DO SÃO FRANCISCO

Abstract

The Araripe basin is an intracontinental pull-apart basin located at the northeast of Brazil that occurs along the NE trend, denominated Cariri-Potiguar. Among its main units, the rocks of the post-rift phase are characterized by the occurrence of carbonates and evaporites of the Santana formation, the target unit of this study. In the northern portion of the basin, there are several expressive outcrops that make it possible to characterize the performance of geomechanical properties. The studied units include laminated limestones that sometimes occur interspersed with shales and carbonate-rich shales. The objective of this work is to identify the relation between the geomechanical and petrophysical properties of the carbonate rocks of the Araripe basin. The methodology of this work implies in outcrop structural and faciological analysis, in situ geomechanical analysis performed with the Schmidt hammer and, laboratory petrophysics. We visited two distinct outcrops of the Santana Formation. In the first, laminated limestones are present. Such rocks exhibit normal faults with cm-scale offset, with plane dipping to NE, demonstrating a brittle behavior of the rock. In the second outcrop, calcarenite, gypsiferous, greenish shales and carbonate-rich shales were identified. Such units exhibit asymmetric folds and axial planes, suggesting a main horizontal stress field oriented along the E-W direction. Our results indicated that the laminated limestones presented Unconfined Compressive Strength (UCS) values between 57 and 115 MPa, while the gypsum, about 68 MPa and the shales, UCS values between 11 and 21 MPa. The petrophysical analyses of the limestones presented the average of 15% of porosity, followed by shales and evaporites with 8 and 2.5%, respectively. The grain density of the limestones is 2.7 g/cm^3 , the gypsum 2.3 g/cm^3 and the shales 2 g/cm^3 . Higher porosity rocks presented lower UCS values, suggesting an inverse relation between porosity and UCS. Thus, rocks presenting higher total density values showed higher UCS values, suggesting a direct relation between density and UCS. The same behavior was observed on grain density analysis. Our results indicated that the porosity of the rock was not solely determinant to infer the UCS of the rocks. Other properties such as grain density presented a more direct influence on the rock resistance. The rocks analyzed in the field are deformed accordingly with their geomechanical properties, as observed in limestones, which demonstrated a greater amount of brittle structures, mainly fractures, in both compressive and distensive regimes. This behavior differs from carbonate-rich shales, which presented a larger amount of asymmetric folds due its plastic geomechanical behavior.

Introdução

Reservatórios carbonáticos são responsáveis por grande parte das reservas de petróleo mundiais. Tal importância vem crescendo ao longo dos últimos anos, principalmente após a descoberta de campos petrolíferos presentes no Pré-Sal, no Brasil. Por se tratarem de rochas de grande complexidade devido à sua forte heterogeneidade, um melhor entendimento das propriedades físicas de rochas carbonáticas, torna-se de grande necessidade para o desenvolvimento de campos petrolíferos carbonáticos. Este estudo teve como objetivo analisar as propriedades mecânicas, estruturais e petrofísicas de calcários laminados da Formação Santana da Bacia do Araripe, comparando suas características com as de evaporitos e folhelhos pertencentes à mesma formação. Para isso foram obtidas medidas geomecânicas com a utilização do martelo de *Schmidt* e coleta de amostras em formato de plugue, utilizando uma plugadeira motorizada portátil. Adicionalmente, foi realizada análise estrutural ao longo de três afloramentos localizados na região centro-norte da Bacia do Araripe (Figura 1).

A área estudada localiza-se no interior dos estados do Ceará, Piauí e Pernambuco (Figura 1), no centro da província da Borborema (Almeida e Hasui, 1984). A região está inserida na Formação Santana, especificamente os membros Romualdo e Crato, divisão proposta por Beurlen (1971), de idade NEOAPTIANA-EOALBIANA (Assine, 2007) e estágio tectônico identificado como Pós-Rifte (Ponte&Ponte Filho, 1996). Assine (1990) atesta que há um ciclo transgressivo-regressivo com ingressão marinha de curta duração nessa sequência, onde se pode associar a um grande nível de concreções carbonáticas fossilíferas e extensas jazidas de gipsita.

O Membro Crato, indicado por ter grande associação fossilífera nos calcários laminados e folhelhos associados, é caracterizado pela inexistência de formas marinhas, indicando assim, um ambiente de sedimentação lacustre (Neumann, 1999). Nessa Seção, há ocorrência de camadas de Gipsita em agregação de fácies com folhelhos verdes e pretos, observados no topo do Membro Crato e em contato com o Membro Romualdo (Assine, 2007). O Membro Romualdo apresenta um empilhamento transgressivo. A porção basal é caracterizada pela presença de arenitos interestratificados com folhelhos, aflorantes na localidade de Romualdo, entre Crato e Barbalha (Chagas, 2006). O topo do Membro Romualdo é constituído por folhelhos verdes, ricos em ostracodes.

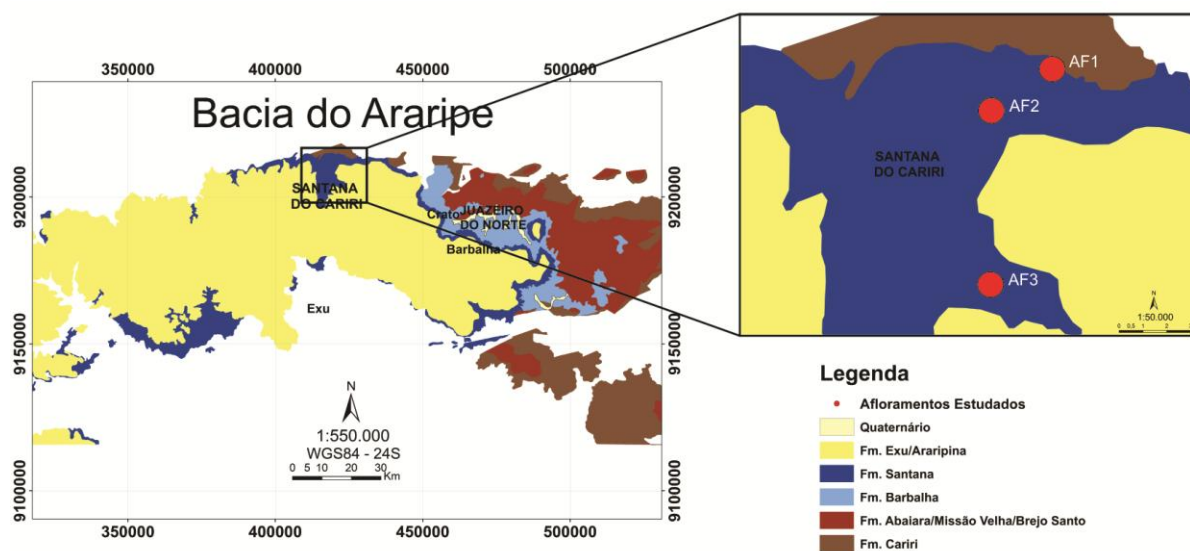


Figura 1: Mapa geológico da Bacia do Araripe. Em preto, localização dos afloramentos estudados. Modificado de Assine (2007)

Metodologia

Inicialmente realizamos a análise estrutural dos afloramentos, que consistiu em precisas descrições dos afloramentos a partir de medições com bússola em campo, tratamento dos dados obtidos. Nesta análise, os tipos de estruturas analisadas foram falhas, dobras e fraturas, onde foram interpretadas a partir de suas geometrias e atitudes. Em seguida realizamos a análise e descrição das fácies aflorantes, levando em consideração características relevantes tais como a litologia, cor, granulometria e estruturas sedimentares. Essa análise foi baseada nos conceitos gerais abordados por Borghi (2000).

Posteriormente, para a obtenção de dados geomecânicos, utilizamos o martelo de *Schmidt* para estimar a resistência à compressão uniaxial (UCS) através da conversão de valor de rebote indicado pelo martelo. A última etapa executada foi uma análise petrofísica, onde foram preparadas 6 amostras de calcários laminados, 7 amostras de gipsita e 20 de folhelhos. As amostras utilizadas foram plugues cilíndricos de 3,65 cm de diâmetro e comprimento variando de 2 a 7 cm. Para as análises

petrofísicas, utilizamos o método de porosimetria por expansão gasosa para obtenção de porosidade e permeabilidade. O equipamento utilizado foi o poropermosímetro UltraPoroPerm 500®. Adicionalmente, realizamos medição de volume de poros, porosidade, densidade de grãos e densidade total, através das equações 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

$$V_p = V_t - V_g \quad (1)$$

$$\varphi = \frac{V_p}{V_t} \times 100\% \quad (2)$$

$$\rho_g = \frac{M_{seca}}{V_g} \quad (3)$$

$$\rho_t = \frac{M_{seca}}{V_t} \quad (4)$$

Resultados e Discussão

Afloramento 1

O afloramento pertencente à Formação Santana, consiste em um corte de pedreira onde é possível delimitar seis distintas camadas, utilizando como critério para diferenciá-las, a composição e o grau de fraturamento (Figura 3). Da base para o topo, podemos nomear as fácies de AF1-A, AF1-B, AF1-C, AF1-D, AF1-E, AF1-F, respectivamente, onde, AF1-A é composta por calcários laminados de coloração esverdeada, apresentando baixo grau de fraturamento e valor de UCS de 93 MPa. A fácies AF1-B é composta por calcários laminados de coloração rosa, apresentando baixo grau de fraturamento e valor de UCS alto, atingindo 115 MPa. AF1-C é composta por calcário laminado pouco fraturado com valor de UCS moderado, exibindo valor de 57 MPa. As fácies citadas apresentaram altos valores de UCS, como indicado na tabela 1, sendo a camada AF1-C, menos resistente que as demais. AF1-D e AF1-E consistem em calcários fortemente fraturados de baixa coesão, abaixo da resistência mínima necessária pelo martelo de Schmidt. Não foi possível realizar medição geomecânica na fácies AF1-F devido à impossibilidade de acesso à fácies.

Tabela 1. Resultados da Resistência à Compressão Uniaxial (MPa) do Afloramento 1.

Membro	Tipo de Rocha	Nomenclatura das Fácies	Rebote (R)	Densidade (g/cm ³)	Densidade (kN/m ³)	UCS (MPa)
Crato	Intercalação de Calcários Laminados e Folhelho Laminado	AF1-D; AF1-E; AF1-F	-----	-----	-----	-----
Crato	Calcários Laminados	AF1-C	39.5	2.271	22	57
Crato	Calcários Laminados	AF1-B	55.8	2.271	22	115
Crato	Calcários Laminados	AF1-A	51.4	2.271	22	93

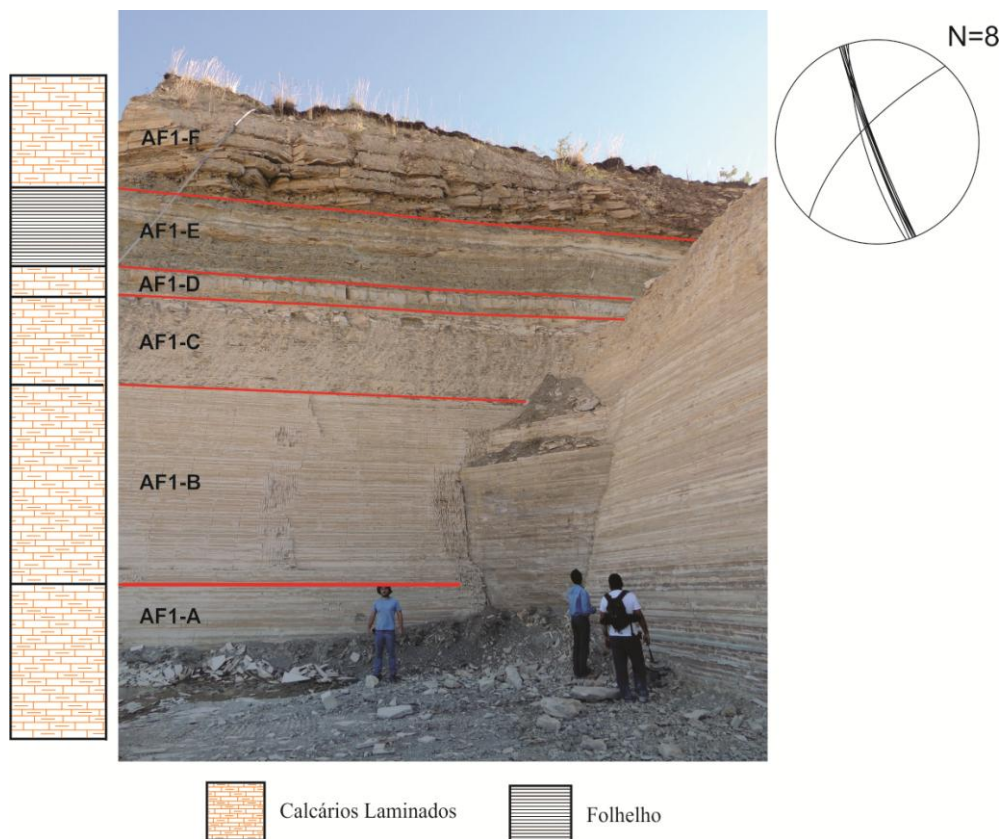


Figura 3: Vista geral do afloramento com delimitação das fácies medidas, orientadas de A a F. No canto superior direito o diagrama representa as direções de oito falhas no afloramento. Na extremidade esquerda há uma seção colunar associada à divisão das fácies aflorantes.

No local foram identificadas fraturas subverticais de direção NW-SE, com caimento para SW, além de uma falha normal de rejeito centimétrico com plano mergulhando para NE, demonstrando um comportamento rúptil da rocha. As feições observadas no local indicam um esforço principal distensivo ou σ_1 subvertical.

Afloramento 2

Nesse afloramento é possível distinguir dois membros da Formação Santana: Romualdo e Crato. O topo do afloramento é formado pelo Membro Romualdo onde afloram as camadas de folhelhos e arenitos, com coloração mais escura, e finas camadas de conglomerados e calcarenitos, topo da Formação Santana. Esse membro é marcado por falhas oblíquas bem marcadas (Figura 10a), apresentando estruturas em flor, associando cinemática transtensiva. Na base do afloramento está o topo do Membro Crato, que por sua vez aflora uma camada evaporítica composta predominantemente por gipsita, reclassificada pela denominação de “Camada Ipubi” (Assine, 2007), denominada neste trabalho por AF2-A (Figura 10c). Esta fácies é sobreposta a folhelhos negros betuminosos e fossilíferos, apresentando coloração negra avermelhada e negra esverdeada, representadas na mesma figura como R-Sh e G-Sh, respectivamente. Dentre as medições com o martelo de Schmidt, a camada evaporítica, AF2-A, mostrou o maior valor de UCS, obtendo assim, um valor médio para UCS de 68 MPa, enquanto que as camadas pelíticas, R-Sh e G-Sh, obtiveram valores médios mais baixos de 21 e 17 MPa, respectivamente, como observado na tabela 2.

Tabela 2. Resultados da Resistência à Compressão Uniaxial (MPa) do Afloramento 2

Membro	Tipo de Rocha	Nomenclatura das Fácies	Rebote (R)	Densidade (g/cm ³)	Densidade (kN/m ³)	UCS (MPa)
Romualdo	Folhelho Amarelado	Y-SH	11.25	1.873	18	14
Romualdo	Folhelho Acinzentado	B-SH	20	1.873	18	20
Romualdo	Conglomerado	AF2-B	14.5	---	---	---
Crato	Gipsita	AF2-A	45.2	2.264	22	68
Crato	Folhelho Avermelhado	R-SH	21.8	1.873	18	21
Crato	Folhelho Esverdeado	G-SH	15.25	1.873	18	17

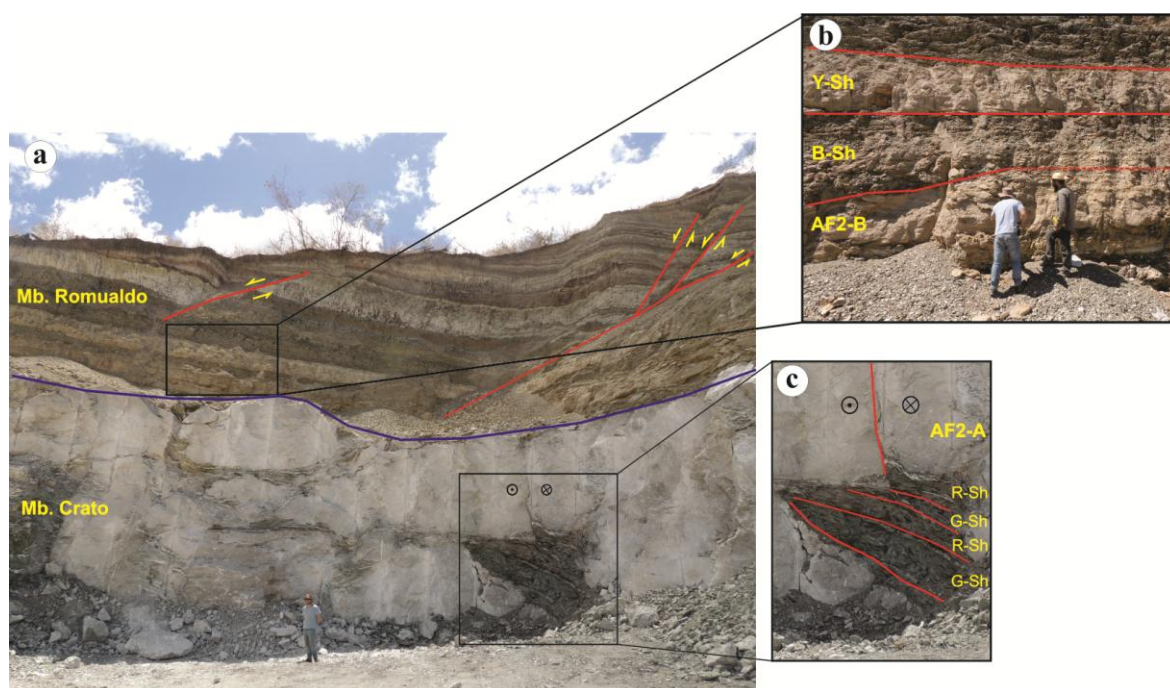


Figura 5: Vista geral do Afloramento 2. (a) Contato entre os membros Romualdo e Crato, com presença de falha normal e estrutura em flor negativa. (b) Em b, detalhe das fácies medidas na porção basal do Membro Romualdo. (c) Em c, detalhe dos folhelhos fossilíferos presentes abaixo da camada evaporítica.

Dentre as três fácies analisadas no Membro Romualdo, o folhelho acinzentado apresentou um alto valor de UCS de 20 MPa, representado por B-Sh na Figura (5b), enquanto que o folhelho amarelado, Y-Sh, resultou num valor muito baixo de 14 MPa para UCS. Foi possível obter apenas os valores de UCS de 5 das 6 fácies aflorantes, como mostra a Tabela 2, sendo o conglomerado o único não medido pois não foi possível coletar amostra devido a baixa coesão da rocha.

Propriedades Petrofísicas

As amostras de Calcários, Folhelhos e Gipsita, possuem diferentes valores de porosidade, onde os Calcários demonstraram maiores valores de UCS, variando entre 57 e 115 Mpa e porosidades na faixa de 15%. Os folhelhos apresentaram grande variedade de valores de porosidade, no intervalo de 6 a 11%, mas uma resposta praticamente constante para a resistência uniaxial. Enquanto isso, as amostras de gipsita indicaram valores médios de porosidade entre 1 e 3%, demonstrando diminuição de UCS com o aumento da porosidade.

No caso dos calcários laminados, é possível notar que a amostra com menor porosidade, 15%, obteve o maior valor de resistência, 115 Mpa, enquanto que, a amostra com aproximadamente 17% de porosidade respondeu de forma menos resistente, apresentando 57 Mpa, percebendo assim, uma relação inversamente proporcional entre porosidade e resistência (Figura 8).

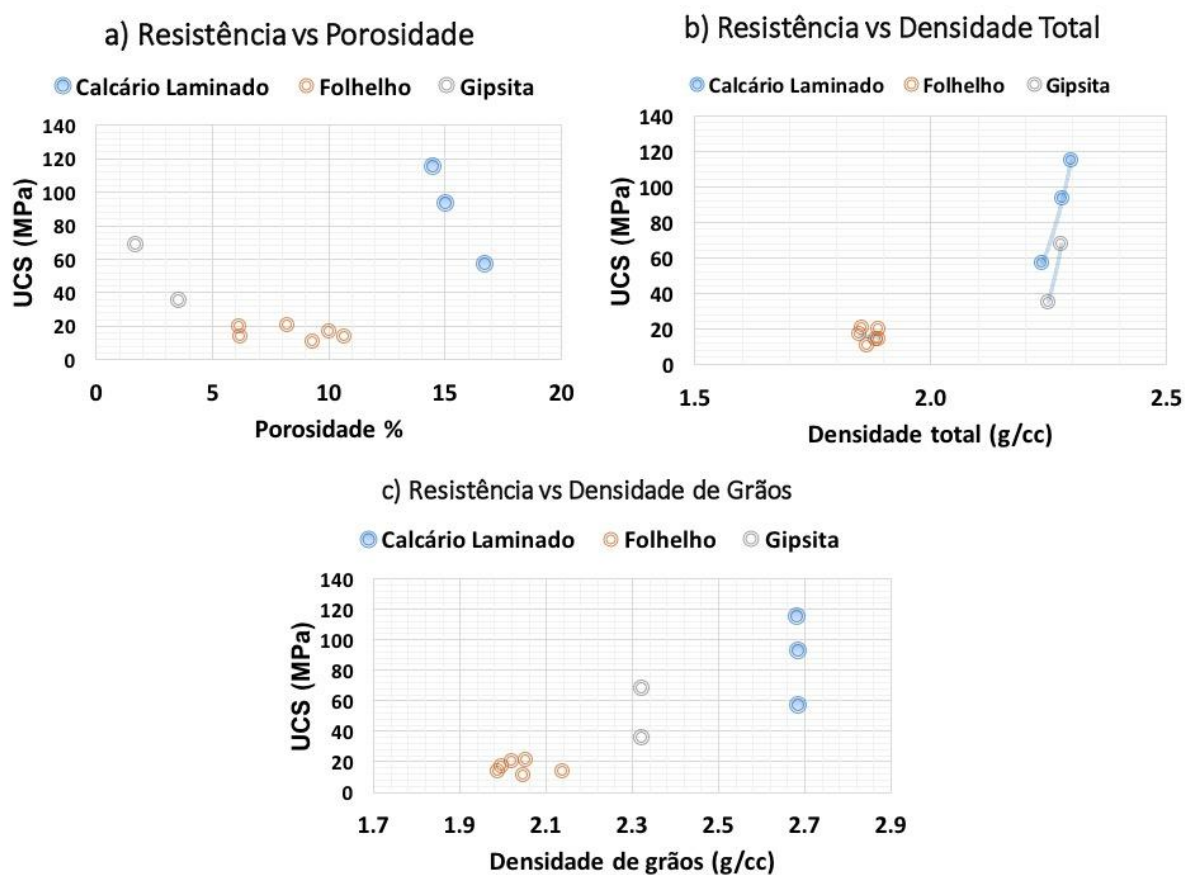


Figura 8. (a) Gráfico de Resistência vs Porosidade. (b) Gráfico de Resistência vs densidade Total. (c) Gráfico de Resistência vs Densidade de grãos

A relação que pode se ter entre a resistência mecânica e a densidade total pode ser observada na Figura (8b). Os calcários e Evaporitos possuem uma maior densidade total, na faixa de 2.2 g/cm^3 e, portanto, oferecem uma maior resposta à compressibilidade uniaxial, com valores de UCS variando entre 35 e 115 MPa. Os folhelhos demonstraram uma menor resistência, com variância entre 11 e 21 Mpa para uma densidade média de 1.85 g/cm^3 . Os valores de densidade total para os folhelhos são aparentes devido à saturação de óleo presente na rocha.

Quando se trata de densidade de grãos, a Figura (8c) mostra uma relação diretamente proporcional quando se associa essa propriedade com a resistência mecânica. A densidade de grãos dos folhelhos foi menor do que as outras rochas dos afloramentos, com valores variando entre 3 e 2.2 g/cc, em seguida, a gipsita demonstrou valores médios de 2,3g/cc, e por fim, os calcários com maiores valores na faixa de 2.7g/cc. Percebe-se que entre folhelhos, evaporitos e calcários, o aumento da densidade de grãos implicou num aumento de resistência.

Conclusões

Os maiores valores de UCS foram observados nos Calcários Laminados do afloramento 1. Nesse afloramento, há predominância de deformações rúpteis e grande quantidade de fraturas. Os valores intermediários de UCS foram obtidos na gipsita, que apresentou deformação dúctil. Os menores resultados de resistência à compressão uniaxial foram observados nos folhelhos. Os folhelhos são rochas porosas, com elevado grau de fissilidade e fraturas, e essas propriedades são nucleadoras de tensão, com isso, ao se aplicar certo impacto nesse tipo de rocha, a energia que é imposta a ela é facilmente dissipada. Dentre todos os tipos de folhelhos estudados, os presentes no afloramento 2 demonstraram valores de UCS superiores aos folhelhos do afloramento 3. Isso pode ter ocorrido devido a presença de óleo, no folhelho do afloramento 2, reduzindo a resistência mecânica desta rocha. Baixos valores de porosidade não foram requisitos para a rocha apresentar maior sensibilidade à tensão, já que o comportamento da rocha não é exclusivamente dependente da porosidade (Hoshino, 1974), como foi possível observar na Gipsita que possui baixa porosidade e resistência relativamente alta, mas também de diversos fatores como, peso específico, etc.

Valores de Densidade Total e de grãos nas rochas estudadas nos afloramentos demonstraram uma relação diretamente proporcional às medidas de resistência uniaxial indicando que quanto maior o valor de densidade total e densidade de grãos (Smorodinov, 1970), maior a resistência. Çobanoğlu & Çelik (2012) em estudos sobre resistência de travertinos, concluíram de forma similar que a variação da densidade total, ou o peso específico, influencia exponencialmente os valores de UCS, ou seja, quanto maior o peso específico da rocha, maior a sua resistência. Deve-se levar em consideração que a densidade total depende da porosidade e da densidade de grãos, por isso, mesmo com a densidade sendo bem próxima para cada rocha, foram obtidos valores que variaram bastante para resistência.

Concluimos que, de acordo com as amostras de calcários laminados analisadas da Bacia do Araripe, as maiores variações na porosidade (maiores que ~5-10%) são responsáveis por mudanças na resistência a compressão uniaxial das rochas, onde a partir do aumento da porosidade, cada rocha particularmente diminui suas características de resistência. Porém outras propriedades petrofísicas foram responsáveis por alterações mecânicas nas rochas, como a densidade de grãos e densidade total. Dessa forma, conclui-se que cada propriedade tem seu grau de influência na resistência mecânica, porém a análise do comportamento geomecânico deve ser abordada levando em consideração o conjunto das propriedades petrofísicas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao convênio PETROBRAS/UFCEG TC 0050.0094707.14.9, coordenado pelo Prof. José Agnelo Soares, pelo financiamento das atividades desenvolvidas neste trabalho, à PETROBRAS pela permissão para a publicação destes resultados. Agradecemos ao PRH-42 pela concessão de bolsa.

Referências Bibliográficas

- ALMEIDA, F.F.M. HASUI, Y. O Pré-Cambriano do Brasil. EdgardBlücher, São Paulo. 378 pp, 1984.
- ASSINE, M. L. Sedimentação e tectônica da Bacia do Araripe (Nordeste do Brasil). 1990. 124 p. il. Tese (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1990.
- ASSINE, M. L. Bacia do Araripe. Boletim de Geociências da Petrobrás, [S.L], p. 371-389, mai./nov. 2007.
- BEURLIN, K. L. As condições ecológicas e faciológicas da Formação Santana na Chapada do Araripe (Nordeste do Brasil). An. Acad. Brasil. Ci. (supl.), Rio de Janeiro, 43: 411- 415. 1971
- BORGHI, L. Visão geral da análise de fácies do ponto de vista da arquitetura deposicional. Boletim do Museu Nacional. Nova Série Geologia, Rio de Janeiro, v. 53, n.58, p. 1-26, 2000.
- CHAGAS, D. B. Litoestratigrafia da Bacia do Araripe: reavaliação e propostas para revisão. Rio Claro. p. 116 Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. 2006
- ÇOBANOĞLU & ÇELİK. Determination of strength parameters and quality assessment of Denizli travertines (SW Turkey)
- HOSHINO K. Effect of porosity on the strength of the clastic sedimentary rocks. Proceedings of the 3rd International Congress on Rock Mechanics, Denver, USA, September 1–7, 1974. vol. II, Part A, 1974. p. 511–16.
- NEUMANN, V. H. M. L. Estratigrafia, Sedimentologia, Geoquímica y Diagénesis de los Sistemas Lacustres Aptienses-Albienses de lá Cuenca de Araripe (Nororeste do Brasil). 1999. Tese (Doutorado) – Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona, Barcelona, 1999.
- PONTE, F. C.; PONTE FILHO, F. C. Estrutura geológica e evolução tectônica da Bacia do Araripe. Recife: Departamento Nacional da Produção Mineral (4o e 10o Distritos Regionais): Delegacias do Ministério das Minas e Energia em Pernambuco e Ceará. P. 68. 1996.
- SMORORINOV M.I; Motovilov E.A; Volkov V.A. Determinations of correlation relationships between strength and some physical characteristics of rocks. Proceedings of the 2nd Congress of the International Society of Rock Mechanics, Belgrade, Yugoslavia, September 21–26, 1970. vol. II, Theme 3, 1970. 3 pp.