

Medidas de Propriedades Petrofísicas e Identificação Mineralógica de Afloramentos Carbonáticos

Luan T. de Castro*, Nathaly L. Archilha, Roseane M. Misságia, Marco A. R. de Ceia, Irineu A. Lima Neto e Flávio R. de Souza.

Copyright 2013, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 26-29, 2013.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

This paper aims to mineralogical and petrophysical characterization of carbonates from American outcrops by measures of the mercury and gas porosimetry, X-ray diffraction, X-ray fluorescence and rock physics system to determine the values of P-wave velocity, and through the results, correlate them with empirical equations according Mavko et al., (2009).

Introdução

Embora os carbonatos cubram cerca de 7% da superfície da Terra, estes detêm mais de 60% das reservas mundiais de óleo e 40% de gás, sendo 70% correspondente aos campos gigantes do oriente médio (Figura 1).

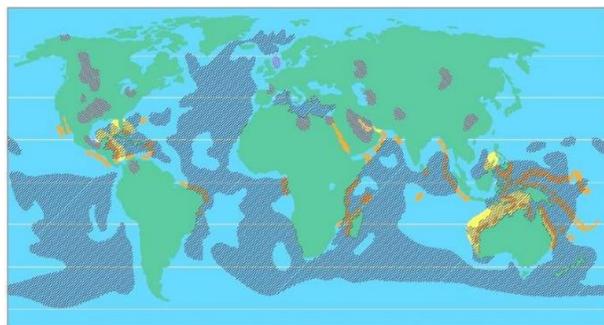


Figura 1 – Distribuição de reservas carbonáticas pelo mundo. Figura obtida de Abel Carrasquilla, 2009.

Estes reservatórios são caracterizados por serem heterogêneos, apresentando uma grande variedade textural e são tipicamente fraturados, o que conduz a um fator de recuperação geralmente baixo e uma relação complexa entre as propriedades da rocha e dados geofísicos (Vanorio et al, 2008).

Portanto, caracterizar os reservatórios carbonáticos através de um estudo combinado entre as propriedades petrofísicas e as relações com as propriedades acústicas fornece uma fundamental compreensão das respostas petrofísicas às características geológicas e a dinâmica do processo.

Neste trabalho foi realizada a caracterização mineralógica de diversas amostras de rochas carbonáticas por meio da difração de raios-X (DRX) e fluorescência de raios-X (FRX).

Através de dados de porosidade (gás e mercúrio) e da mineralogia (método de Rietveld), foi possível determinar a densidade total (*bulk*) e a velocidade da onda P, correlacionando-as com equações empíricas obtidas da literatura (Mavko et al., 2009).

Materiais e Métodos

Foram utilizadas diversas amostras de afloramentos de carbonatos, dentre elas Silurian Dolomite (SD) da formação Thornton, Desert Pink (DP), Austin Chalk (AC), Edwards Yellow (EY) e Edwards White (EW) da formação Edwards Plateau, Indiana Limestone (IL) da formação Bedford e amostra Wiscosin (WS), que não foi identificada a localização.

A fluorescência de raios-X (FRX) é uma técnica não destrutiva que possibilita não só uma análise qualitativa, mas também quantitativa, permitindo identificar a ocorrência e o percentual de cada elemento químico e correlacioná-los com possíveis minerais, facilitando a identificação destes para melhorarr o refinamento da estrutura cristalina das amostras, através do método de Rietveld.

A difração de raios-X e o método de Rietveld foram utilizados para determinar a composição mineralógica das amostras carbonáticas. As medidas foram realizadas no difratômetro com detector rápido, fenda no emissor de 0,4mm, modo de leitura *twotheta/theta* contínuo, 2 θ variando entre 5° e 90°, passo de 0,02° e tempo de 1s por passo. As porosimetrias a gás e a mercúrio foram utilizadas para determinar a porosidade das amostras, sendo que a segunda técnica ainda permitiu a determinação da densidade total das amostras. Com os dados de mineralogia e porosidade foi possível calcular a densidade total e a velocidade primária (V_p) das amostras (0 MPa) e correlacioná-las com as equações empíricas Schön, (2011) - equação 1, onde g é qualquer propriedade total (*bulk*) da amostra. Valores de vagarosidade e densidade dos minerais e do fluido saturante estão apresentados na Tabela 1.

$$g = \sum_{i=1}^n v_i g_i \quad \sum_{i=1}^n v_i = 1 \quad (1)$$

Tabela 1 – Vagarosidade (inverso da velocidade) e densidade de alguns minerais e do fluido. Dados obtidos e adaptados de Mavko et al, (2009).

	Vagoriedade ($\mu\text{s/m}$)	Densidade ($\mu\text{s/m}$)
Calcita	150,60	2,71
Dolomita	136,23	2,87
Feldspato	213,67	2,62
Quartzo	165,28	2,65
Silvita	257,73	1,99
Fluorita	149,70	3,18
Água	620,00	1,00

O valor da velocidade da onda P (V_p) em rocha seca foi medido experimentalmente no sistema de deformação triaxial e de física de rocha instalado no LENEP/UENF, onde a amostra estava submetida a um estado de tensão e compressão. Utilizando esses dados e as equações de Gassman (Mavko et al, 2009), foi possível realizar a substituição de fluidos e determinar V_p , considerando as amostras saturadas por água.

Os dados de velocidade primária foram comparados com as equações empíricas 2 – 4, obtidas de dados experimentais, alguns realizados com a rocha saturada por água, e outros com a rocha seca utilizando a equação de Gassman para substituição de fluidos, todas com pressão efetiva variando entre 10 e 50 MPa.

$$\text{Calcita: } \rho = 1,513 + 0,202 v_p \quad (2)$$

$$v_p = 5,624 - 6,65\phi$$

$$\text{Giz: } \rho = 1,045 + 0,373 v_p \quad (3)$$

$$v_p = 5,059\phi^2 - 8,505\phi + 5,128$$

$$\text{Dolomita: } \rho = 1,843 + 0,137 v_p \quad (4)$$

$$v_p = 6,606 - 9,389\phi$$

Resultados

Com o objetivo de identificar a concentração dos elementos químicos nas amostras por meio da FRX, foram relacionados os óxidos encontrados, conforme proposto por Archilha et al, (2013), com seus possíveis minerais constituintes (Tabela 2).

Tabela 2 - Dados da fluorescência. Os óxidos foram relacionados com possíveis minerais.

	Calcita CaCO_3	Dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Feldspato $\text{Al}_{1,74}\text{Na}_{0,03}\text{O}_8\text{Si}_{2,26}\text{Sr}_{0,84}$	Quartzo SiO_2	Silvita $\text{KCl}(\text{K}_2\text{O})$
AC	89,315	0	0,207	0,18	9,82
DP	98,696	0	0,266	0,204	0,531
EY	98,821	0	0,239	0,234	0,19
IL	92,8	0	0,392	0,666	5,66
SD	0	97,5	0,546	0,661	0,623

Com os dados de difração de raios X e o método de Rietveld foi possível identificar quantitativamente os minerais presentes nas amostras estudadas. Estes dados estão presentes na tabela 3.

A Tabela 4 apresenta os valores de porosidade obtidos pela porosimetria a gás, a densidade bulk determinada por Schön, (2011), e os valores de velocidade primária (V_p) para pressões de confinamento de 0 MPa, 2,5 MPa e 10,5 Mpa.

Tabela 3 - Mineralogia das amostras obtidas pelo método de Rietveld.

Amostras	Calcita	Dolomita	Feldspato	Quartzo	Silvita	Fluorita
AC	99,65	-	-	-	0,35	-
DP	99,61	0,12	-	0,18	0,09	-
EY	99,79	-	-	-	-	0,21
IL	99,46	-	-	0,51	0,33	-
SD	-	100	-	-	-	-
EW	99,86	-	-	0,11	0,04	-
WS	0,66	81,93	1,24	16,17	-	-

Tabela 4 - Valores de velocidade (0 MPa) e densidade obtidas pelas equações de Schön (2011) e velocidades (2,5 MPa e 10,5 MPa) obtidas pelo sistema de física de rochas e as equações de Gassman. A densidade de *bulk* foi obtida pela porosimetria a mercúrio e a porosidade estimada por porosimetria a gás.

Amostras	Schön	Gassman				
	0 MPa	2,5 MPa	10,5 MPa			
	Velocidade (km/s)	Velocidade (km/s)	Velocidade (km/s)	ρ (Schön) (g/cm ³)	ρ_{Hg} (g/cm ³)	ϕ gás (%)
AC	2,634	3,610	3,627	2,248	2,016	26,930
DP	2,641	3,889	3,909	2,251	2,059	26,830
EY	2,956	4,092	4,176	2,333	2,179	22,104
IL	3,549	4,540	4,632	2,444	-	15,402
SD	3,612	5,324	5,565	2,566	-	16,279
EW	4,072	-	-	2,519	1,874	11,172
WS	5,651	-	-	2,756	2,516	4,077

Utilizando os dados da tabela 3 e 4 e as equações 2 – 4, foram gerados os gráficos das figuras 2 – 4. A figura 2 apresenta dois *crossplots*, o primeiro de velocidade por porosidade e o segundo de densidade de bulk por velocidade, ambos para pressão absoluta de 0 MPa.

Com base nos valores de V_p em rocha seca e as equações de Gassman, foram determinados os valores da velocidade para amostras saturadas sobre pressões de 2,5 e 10,5 MPa, como apresentado nas Figura 3 e Figura 4, respectivamente.

Conclusão

Os resultados mineralógicos obtidos por Rietveld com o auxílio da FRX mostraram que as amostras apresentaram calcita ou dolomita como mineral dominante com valores superiores a 99%, podendo conter feldspato, quartzo silvita e fluorita como minerais minoritários (amostras AC, DP, EY, IL, SD e EW), enquanto a amostra WS apresenta dolomita como mineral dominante (81,9%) e quartzo presente em quantidade razoável (16,1%), o feldspato (1,2%) e a calcita (0,6%) são considerados os minerais minoritários.

Observando os valores de densidade total obtidas pela porosimetria a mercúrio e calculado pela equação 1, nota-se uma grande correspondência entre os dois valores, sendo que a diferença percentual é da ordem de 10%, a não ser pela amostra EW. A medida de porosimetria a mercúrio desta amostra será refeita, pois provavelmente esse valor é devido a um erro experimental.

A figura 2 mostra que os dados estimados para pressão efetiva de 0 MPa não estão de acordo com as equações empíricas, uma vez que estes dados não se aproximam das retas determinadas pelas equações 2 - 4. Este já era um resultado esperado, uma vez que estes dados foram

estimados através da mineralogia e da equação 1, em condições atmosféricas, e foram comparados com equações determinadas sobre pressão.

Ao serem submetidas a pressões de 2,5 MPa e 10,5 MPa (Figura 3 e Figura 4, respectivamente), um melhor ajuste entre os dados experimentais e as equações de Gassman pôde ser observado. Os dados submetidos a pressão de 2,5 MPa se comportam conforme a teoria, pois com a pressão de confinamento o espaço poroso da rocha diminui e aumenta o valor da velocidade na amostra. Porém, quando estas mesmas amostras são submetidas a pressão de confinamento de 10,5 MPa, nenhuma mudança significativa no ajuste entre os dados teóricos e experimentais foi observada, sugerindo que esse aumento da pressão de confinamento não provoca redução significativa do sistema poroso da rocha.

Este trabalho se encontra em desenvolvimento, e nem todas as medidas experimentais foram realizadas até o presente momento. Aparentemente, os métodos utilizados para caracterização mineralógica e petrofísica se ajustaram bem para as amostras de calcários, mas para as amostras de dolomitas não foi possível tecer nenhuma consideração, pois percebeu-se que o número reduzido destas amostras, e conseqüente falta de representatividade, prejudicou a análise.

Agradecimentos

Os autores desse trabalho agradecem UENF/LENEP pelas facilidades no desenvolvimento do trabalho e CNPQ/PIBIC pelo financiamento do estudo.

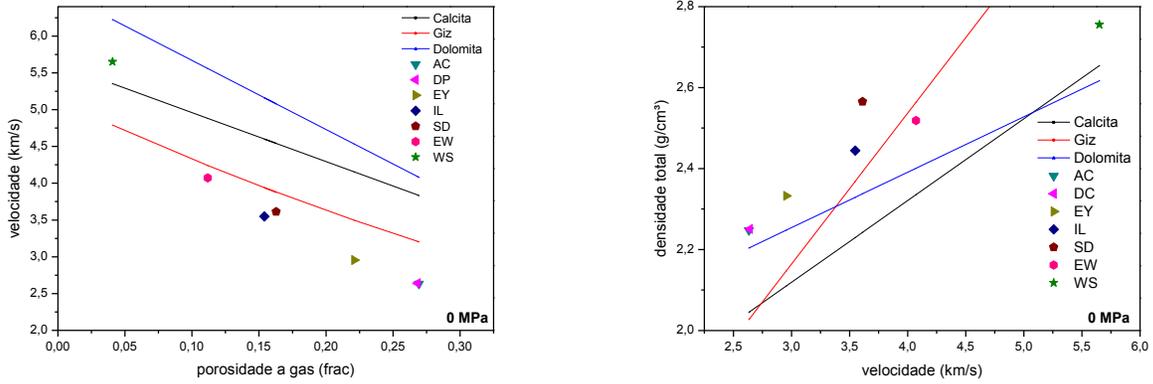


Figura 2: Velocidade x porosidade a gás (esquerda) e densidade total x velocidade (direita) - pressão efetiva de 0 MPa.

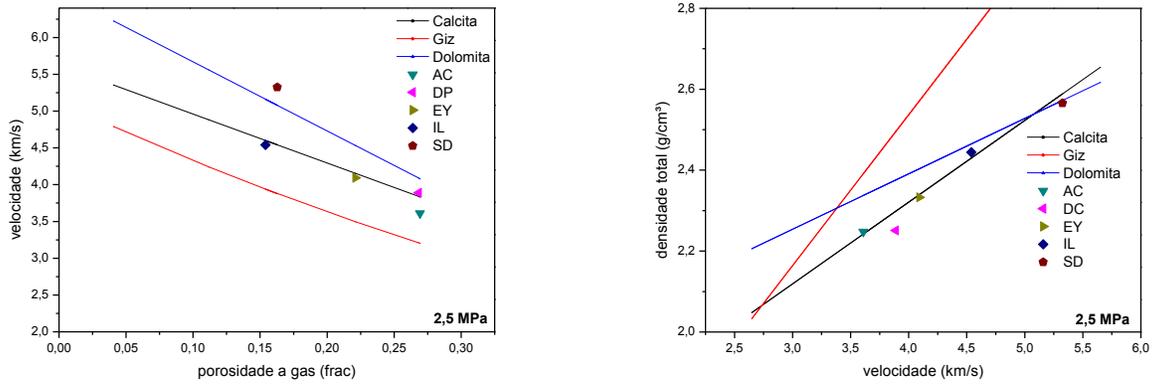


Figura 3: Velocidade x porosidade a gás (esquerda) e densidade total x velocidade (direita) - pressão efetiva de 2,5 MPa.

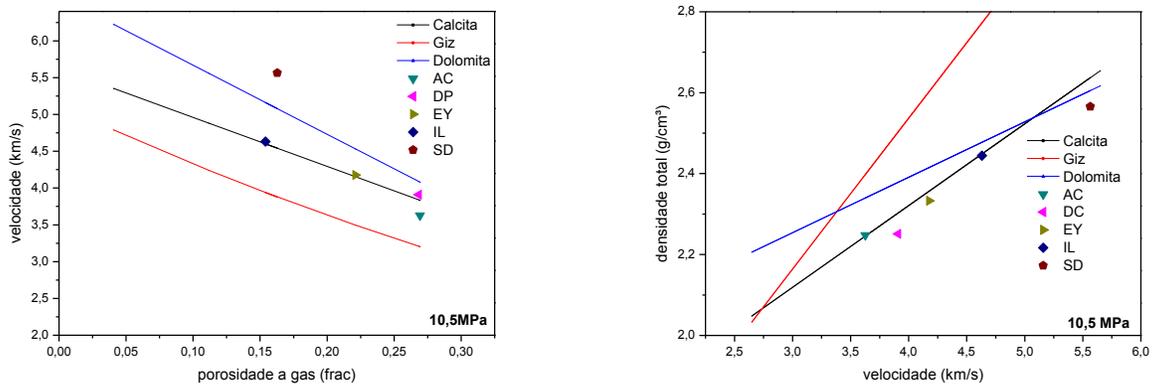


Figura 4: Velocidade x porosidade a gás (esquerda) e densidade total x velocidade (direita) - pressão efetiva de 10,5 MPa.

Referências

- Abel Carrasquilla, 2009. O Petróleo está acabando?, disponível em < abelcarrasquilla.blogspot.com.br/2009_12_01_archive>, acessado em 28/04/2013.
- Archilha, N.L., R.M. Misságia, M.A. Ceia and I.A. Lima Neto, 2012, Comparação entre as constantes elásticas estimadas pelas velocidades e pela composição mineral de rochas carbonáticas, trabalho aceito na V SBGf 2012
- Engenharia de Poço I - Geologia do Petróleo. Disponível em <www.ugf.br/academico/disciplinaplano/arquivos/7372.pdf>, acessado em 26/04/2013.
- L. B. McCusker, R. B. Von Dreele, D. E. Cox, D. Louer and P. Scardi, 1999, Rietveld refinement guidelines, J. Appl. Cryst., v. 32, p. 36-50.
- Rietveld, H. M., 1969, A profile refinement method for nuclear and magnetic structures. Journal of Applied Crystallography, 2, 65 – 71
- Schön, J. H., 2011, Physical Properties of Rocks, a Workbook, volume 8: Elsevier.
- Vanorio, T., C.Scotellaro, and G. Mavko, 2008, The effect of chemical and physical processes on the acoustic properties of carbonate rocks. The Leading Edge, 27, 1040 – 1048