

EFEITO DA COMPOSIÇÃO MINERAL SOBRE AS PROPRIEDADES PETROFÍSICAS DE ROCHAS CARBONÁTICAS DA BACIA DO ARARIPE

M. R. S. SENA* e J. A. SOARES
Universidade Federal de Campina Grande
mabia_ruana@hotmail.com*

Submetido 15/10/2016 - Aceito 23/12/2016

DOI: 10.15628/holos.2017.5159

RESUMO

As rochas carbonáticas apresentam grande importância como reservatórios de hidrocarbonetos em várias bacias sedimentares do mundo. Visando esta importância foi realizado o estudo em rochas carbonáticas da Bacia do Araripe que é a maior das bacias interiores do Nordeste, com o objetivo de avaliar a influência da composição mineral nas propriedades petrofísicas destas rochas. Foram utilizadas quatro amostras de rochas, determinando as propriedades petrofísicas através de ensaios convencionais e a composição mineralógica das rochas através da análise de imagens digitais de microtomografia de raios x (μ CT). Os resultados

alcançados para a simulação da composição mineral indicam que as amostras são formadas essencialmente por calcita e/ou dolomita. Os resultados mostram que os teores dos minerais principais controlam as propriedades petrofísicas, especialmente a densidade e as velocidades elásticas. No entanto, outros fatores também podem afetar substancialmente as velocidades elásticas, como a porosidade, o tipo de porosidade (vugular ou intergranular) e o percentual de microporosidade.

PALAVRAS-CHAVE: Composição mineral, propriedades petrofísicas, Bacia do Araripe.

EFFECT OF MINERAL COMPOSITION ON THE PETROPHYSICAL PROPERTIES OF CARBONATE ROCKS FROM ARARIPE BASIN

ABSTRACT

Carbonate rocks have great importance as hydrocarbon reservoirs in several sedimentary basins in the world. Due to this importance it was performed an evaluation of the influence of the mineral composition on the petrophysical properties of carbonate rocks of the Araripe Basin, the largest interior basin of the Northeastern Brazil. Four rock samples were analyzed to determine its petrophysical properties, by conventional assays, and the mineralogical composition of the rocks through digital image analysis of X-ray microtomography

(μ CT). The results achieved in the simulation of the mineral composition indicate that the samples are mainly composed of calcite and/or dolomite. The results show that the content of major minerals controls the petrophysical properties, especially density and elastic velocities. However, other factors may significantly affect the elastic velocities, as porosity, the type of porosity (vugular or intergranular) and the percentage of microporosity.

KEYWORDS: Mineral composition, petrophysical properties, Araripe Basin.

1 INTRODUÇÃO

As rochas carbonáticas preenchem parte expressiva da crosta terrestre. Essas rochas são decorrentes de episódios de sedimentação química e bioquímica acontecidos desde os tempos mais antigos (Arqueano > 2.5 Ga) até os mais novos (Quaternário < 1.75 Ma). Apresentam como componentes mineralógicos essenciais a calcita e a dolomita, ocorrendo em diferentes proporções e promovendo a sua classificação em calcários, onde há predomínio da calcita, e em dolomitos, onde há predomínio da dolomita. Também, associados, em nível acessório, podem ocorrer outros carbonatos tais como siderita, ankerita e magnesita (VIDAL *et al.*, 2005).

De acordo com Vidal *et al* (2005), em termos da distribuição das rochas carbonáticas no Brasil, todos os estados nordestinos ostentam importantes ocorrências, depósitos e jazidas. Nesse cenário, merecem realce os estados do Ceará, Rio Grande do Norte e Bahia, em virtude de juntos, deterem 80% das reservas da região. Alguns dispõem de imensas jazidas de calcário sedimentar e outros de mármore, além daqueles que encerram ambas as tipologias.

A Bacia do Araripe engloba três estados do Nordeste: Ceará, Pernambuco e Piauí. Possui uma área em torno de 9000 km², que engloba desde a Chapada do Araripe ao Vale do Cariri (VIDAL *et al.*, 2005). Na Figura 1 pode-se observar o seu mapa geológico, sendo considerada a maior das bacias interiores do Nordeste.

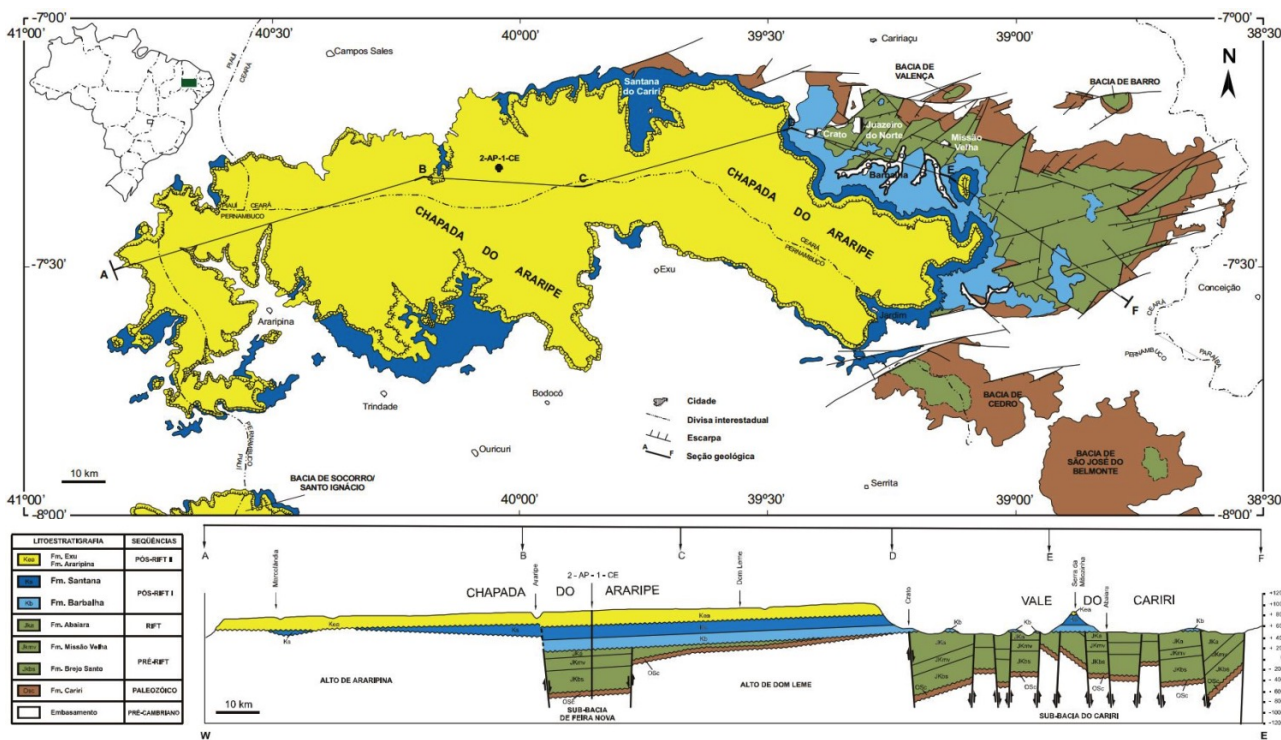


Figura 1: Mapa geológico da Bacia do Araripe.
Fonte: Assine, 2007.

De acordo com Neto *et al.* (2005), o desenvolvimento desta bacia está ligado a uma série de eventos geológicos relacionados ao rompimento do *Gondwana* e subsequente abertura do Atlântico Sul.

Segundo Assine (1992), a bacia apresenta quatro seqüências estratigráficas limitadas por discordâncias regionais: Paleozóica, Juro-Neocomiana (pré-rifte e rifte), Aptiano-Albiana (pós-rifte) e Albiano-Cenomaniana (pós-rifte). Cada seqüência tem uma origem em um contexto paleogeográfico diferente, integrado a outras bacias adjacentes. A seqüência Paleozóica representada por uma única Formação, denominada de Cariri, aflora na parte leste da bacia, definindo os contornos do Vale do Cariri, entretanto, não se resumindo a ele, ocorrendo também em áreas afastadas. A seqüência Juro-Neocomiana é composta pelas Formações Missão Velha, Brejo Santo e Abaiara. Seus sedimentos aparecem principalmente na porção leste da bacia, ao longo do vale do Cariri. A seqüência Aptiano-Albiana é composta pelas Formações Barbalha, Santana e Araripina, aparecendo em quase toda a extensão da região da Chapada do Araripe. Por fim, a seqüência Albiano-Cenomaniana, a qual é formada por uma única unidade litoestratigráfica: Formação Exu.

De acordo com Vidal *et al.*, (2005), a Formação Santana (membros Crato e Romualdo) tem origem marinha/lacustre, apresentando uma seqüência sedimentar estratificada, quase horizontal, constituída por gipsitas, calcários, siltitos argilosos, margas e folhelhos betuminosos formados no período Cretáceo. Apresenta um registro fóssilífero abundante, onde são encontrados pequenos peixes e insetos, além de fragmentos vegetais.

De acordo com Silva (1986), o membro Crato tem uma espessura média em torno de 50 m e pode assentar-se discordantemente sobre a Formação Abaiara. É constituído por calcários micríticos, cinza claro e creme, com estratificação paralela e folhelhos escuros e cinza (PONTE & APPI, 1990).

O membro Romualdo é considerado um dos grandes depósitos fóssilíferos do país, onde foi encontrada uma grande diversidade de peixes (arraias, tubarões, etc), répteis (crocodilomorfos, dinossauros, etc), além de invertebrados e plantas (KELLNER, 2002). O mesmo é constituído por margas, calcários, lentes de arenitos friáveis esbranquiçadas e intercalações de folhelhos (PONTE & APPI, 1990).

Este trabalho tem o objetivo de avaliar o efeito da composição mineral nas propriedades petrofísicas das rochas carbonáticas da bacia do Araripe (Formação Santana).

2 METODOLOGIA

Foram analisadas quatro amostras de rochas carbonáticas (A1, A2, A3 e A4), provenientes de afloramentos da Formação Santana da Bacia do Araripe. As análises petrofísicas realizadas são constituídas por ensaios convencionais em plugues (RIBEIRO, 2014; GURJÃO *et al.*, 2013; CAVALCANTI *et al.*, 2013) e por simulações computacionais a partir de imagens digitais de μ CT adquiridas em subamostras dos plugues. Ambas as etapas foram realizadas no Laboratório de Petrofísica da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). As propriedades petrofísicas medidas foram porosidade (ϕ), densidade de grãos (ρ_g), densidade total (ρ_b), velocidade de propagação da onda compressional (VP) e cisalhante (VS). A caracterização mineralógica foi realizada através da análise de imagens de μ CT.

Inicialmente, as rochas do afloramento da Formação Santana, passaram por um processo de serragem no laboratório de preparo de amostras, localizado na Unidade Acadêmica de Mineração e Geologia. A serragem tem o intuito de facilitar a preparação dos plugues cilíndricos de rochas, que são feitos na plugadeira de bancada, apresentando uma polegada e meia de diâmetro e altura em torno de 5 cm.

A terceira etapa consiste no desbaste, realizado na retificadora de plugues. Sua finalidade é garantir faces planas e paralelas, necessárias aos ensaios de velocidade de onda.

Após esta etapa, as amostras foram levadas ao laboratório de Petrofísica da UFCG, onde foram submetidas a uma secagem na estufa por um período de 24 horas em uma temperatura de 80°C. Em seguida, fez-se a pesagem dos plugues em uma balança eletrônica de precisão. Por fim, realizou-se a medição de suas dimensões, comprimento e diâmetro, com o auxílio de um paquímetro digital.

As análises de porosidade e densidade de grãos foram realizadas com o auxílio de um permoporosímetro a gás. Para a realização do ensaio petrofísico de densidade de grãos e porosidade, cada plugue de rocha é instalado individualmente dentro de um copo matriz. Uma válvula é aberta e o gás é liberado para dentro de uma célula de referência com volume (V_1) conhecido. A pressão P_1 é lida eletronicamente pelo aparelho. Logo após esta leitura é aberta uma válvula conectando a célula de referência com o copo matriz. Uma pressão P_2 é lida pelo aparelho.

O volume da amostra é calculado a partir de dimensões do plugue cilíndrico obtidas nas medições com o paquímetro. Como mencionado acima, para realizar o cálculo da porosidade, faz-se necessário conhecer o valor do volume poroso. Para tal, emprega-se a Lei de Boyle, para determinar o volume dos grãos a partir da expansão de uma massa conhecida de gás (neste caso, nitrogênio) para dentro de um suporte de amostra calibrado.

As análises de velocidade de propagação das ondas P e S foram realizadas no equipamento Autolab500®.

As imagens microtomográficas foram adquiridas no Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas da Universidade Federal de Santa Catarina, no equipamento XRADIA, modelo Versa XRM – 500. Este opera uma fonte de raios-x de 30 a 160 kV, potência de 2 a 10 W, trabalha com um tamanho máximo de objetos de até 300 mm de comprimento, apresenta uma resolução espacial 3D de até 0,7 μ m e lentes com aumento óptico e geométrico de até 40 vezes. As imagens são adquiridas por uma câmera tipo CCD de 2048 x 2048 pixels e suporta amostras de até 15kg de massa.

Os dados do microtomógrafo são registrados na forma de projeções do objeto, em diversos ângulos, sobre o detector plano, obtendo as chamadas radiografias. Em seguida essas radiografias passam por um processo de reconstrução a fim de gerar os tomogramas bidimensionais (*slices*), os quais quando empilhados, geram uma imagem tridimensional do objeto imageado.

O programa computacional utilizado para caracterização mineral por meio de imagens de microtomografia é o *Avizo Fire* que realiza análises tridimensionais na linha de ciências dos materiais. Nas imagens se reconhece cada fase mineral pela sua tonalidade e pelas formas apresentadas.

Em seguida se extrai um subvolume da imagem para cada fração mineral observada e, a partir dos histogramas de cada fração, se determina o intervalo e o valor médio de tom de cinza característico de cada fração mineral. Constrói-se um gráfico de dispersão, no qual são plotados os valores de tons de cinza médio e de densidade das frações minerais e de poros conhecidas e ajusta-se uma função contínua de potência aos pontos do gráfico. Para as frações minerais desconhecidas, por interpolação pela função de ajuste de potência, determina-se a densidade. E por fim com a densidade calculada para uma dada fase desconhecida identifica-se o mineral que apresenta aquela densidade e que ocorre em associação com os minerais típicos de rochas carbonáticas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise por microtomografia forneceu a identificação e a quantificação dos minerais presentes nas amostras de rochas, de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1: Composição mineral por μ CT.

Amostra	Porosidade (%)	Fases minerais (%)						
		Calcita	Dolomita	Ankerita	Quartzo	Limonita	Argila	Pirita
A1	1,14	-	99,37	-	-	0,56	-	0,07
A2	0,06	84,36	0,18	-	15,46	-	-	-
A3	0,35	81,78	0,78	0,005	17,43	-	-	-
A4	31,92	79,00	0,32	-	-	-	20,68	-

Pode-se observar que os componentes mineralógicos essenciais de uma rocha carbonática, calcita e dolomita, foram identificados em todas as amostras analisadas. Em níveis acessórios foram identificados quatro minerais: quartzo, ankerita, limonita e pirita. Em uma amostra foi identificada a presença de argila.

A Tabela 2 apresenta os valores obtidos para as propriedades petrofísicas medidas de forma convencional em laboratório. Os ensaios petrofísicos foram realizados com as amostras secas. A porosidade e as densidades (total e de grãos) foram medidas sob pressão e temperatura ambientes, enquanto que as velocidades elásticas foram medidas sob temperatura ambiente e pressão confinante efetiva de 40 MPa.

Tabela 2: Propriedades petrofísicas medidas em laboratório.

Amostra	ϕ (%)	ρ_g (g/cm ³)	ρ_b (g/cm ³)	VP (m/s)	VS (m/s)
A1	12,7	2,819	2,460	5661	3166
A2	10,6	2,685	2,398	5413	2954
A3	12,6	2,680	2,339	4254	2531
A4	22,6	2,623	2,025	3503	2045

Comparando os valores de porosidade das tabelas 1 e 2, observa-se que os valores de porosidade medidos em laboratório e por μ CT divergem consideravelmente. Com exceção da

amostra A4, os valores de porosidade medidos por μ CT são muito menores do que aqueles medidos de forma convencional em laboratório. Isto acontece devido a vários fatores. A porosidade por μ CT, como medida neste trabalho, diz respeito apenas à macroporosidade, desprezando a microporosidade, a qual pode ser relativamente alta neste tipo de rocha, conforme discutido por Vidal (2016). Além disso, a possível presença de porosidade do tipo vugular não pode ser captada pela amostra do ensaio de μ CT, uma vez que tal amostra possui dimensões menores que as do próprio poro do tipo vugular. Há ainda a questão da escala de investigação, uma vez que os ensaios convencionais são realizados em plugues com dimensões centimétricas, enquanto que a análise de μ CT é realizada em subamostras com dimensões de poucos milímetros. Este fator está intimamente ligado ao grau de heterogeneidade das amostras. Se um dado plugue fosse completamente homogêneo, qualquer subamostra apresentaria as mesmas propriedades do plugue. No entanto, em um plugue de composição heterogênea, as propriedades de uma dada subamostra dependem da porção do plugue de onde tal subamostra foi extraída. Este efeito pode explicar o fato da subamostra A4 ter apresentado um valor de porosidade superior ao do próprio plugue.

A Figura 2 apresenta a relação entre a densidade total e a porosidade medidas de forma convencional. Nesta figura são observadas duas linhas de tendência: A azul claro corresponde às amostras que apresentam matriz predominantemente calcítica, enquanto que a linha azul escuro às amostras de matriz dolomítica. Embora a redução linear da densidade total com o aumento da porosidade seja observada, há uma pequena dispersão em torno das linhas de tendência. Isto sugere que a composição mineral das amostras inclui outros minerais acessórios.

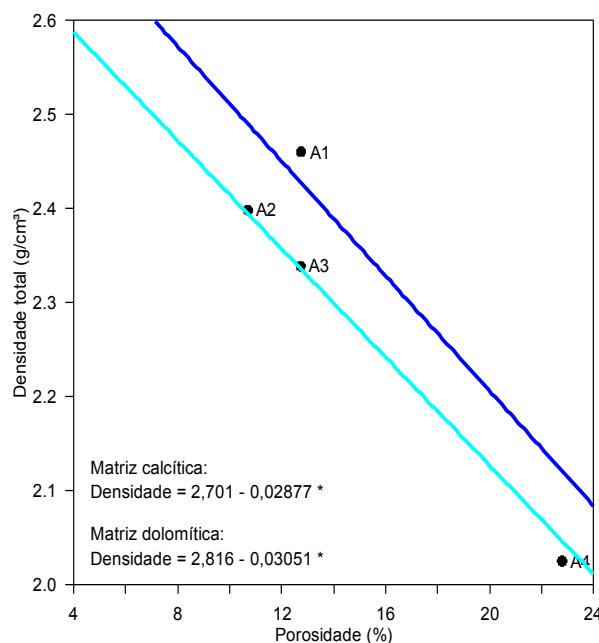


Figura 2: Relação entre densidade total e porosidade.

A Figura 3 apresenta a relação entre a densidade de grãos medida em laboratório e uma estimativa da densidade de grãos a partir das imagens microtomográficas. Idealmente os pontos

deveriam cair sobre a diagonal positiva da figura. Vê-se que a maioria dos pontos se encontra próxima a essa diagonal. Isso indica que para essas amostras os teores minerais estimados por análise de μ CT se aproximaram dos valores reais. No caso da amostra A4, que se encontra mais afastada da diagonal, a provável explicação seja o fato da subamostra retirada para análise de μ CT não ser representativa de todo o plugue, devido ao grau de heterogeneidade da amostra.

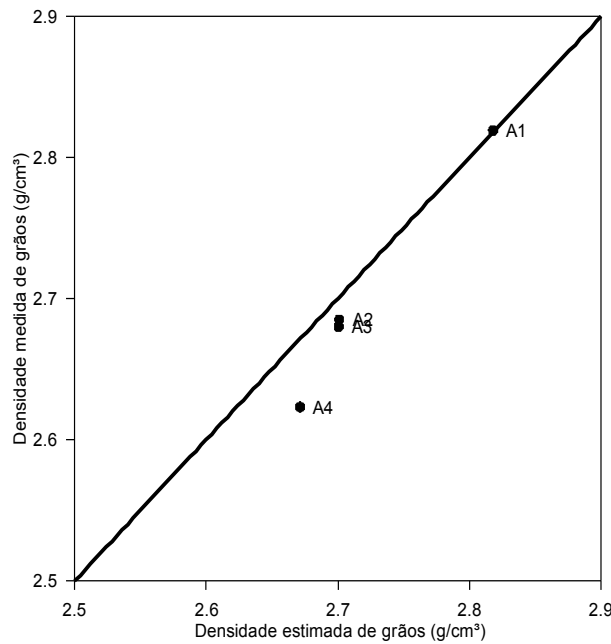


Figura 3: Relação entre a densidade de grãos medida em laboratório e a estimada por μ CT.

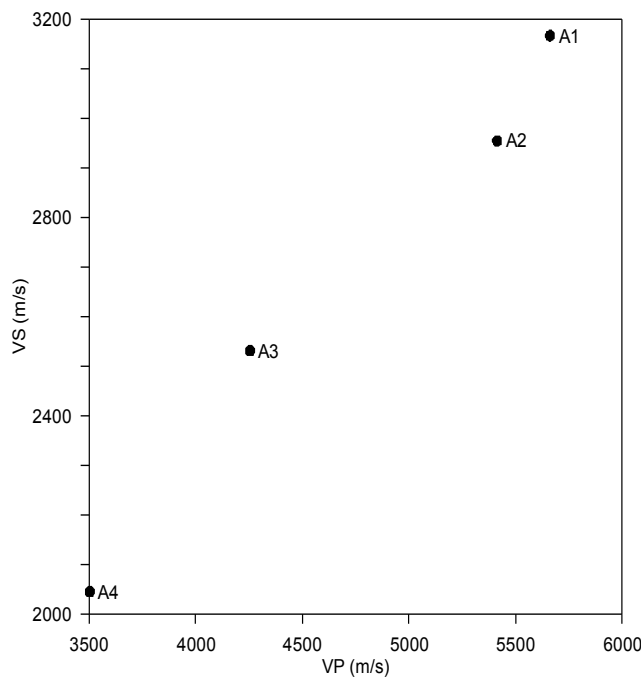


Figura 4: Relação entre as velocidades VP e VS medidas sob pressão confinante efetiva de 40 MPa.

A Figura 4 apresenta a relação entre as velocidades de propagação das ondas P e S medidas sob pressão confinante de 40 MPa. A amostra A4 apresenta os menores valores de velocidade devido à sua elevada porosidade e à presença significativa de argila, como indicado pela análise por μ CT. A amostra A1 apresenta as mais altas velocidades, as quais são controladas pela matriz dolomítica, uma vez que a sua porosidade não difere muito das amostras A2 e A3. Já as amostras A2 e A3, que apresentam valores intermediários de velocidades, possuem matriz calcítica e teores consideráveis de quartzo.

A Figura 5 apresenta a relação entre a velocidade da onda P e a composição mineral, a porosidade total, o tipo de porosidade e o percentual de microporosidade das amostras. Nesta figura se observa que há uma relação direta entre os teores das frações minerais mais densas (calcita e dolomita) e a velocidade da onda P (observar as amostras A1 e A2). No caso da amostra A4 além desta relação, há o efeito da quantidade significativa de argila, que associada à elevada porosidade determina a baixa velocidade. As amostras A2 e A3 apresentam teores de calcita semelhantes à da amostra A4, no entanto, seus teores de quartzo, determinam as velocidades medianas. Para a amostra A3 outro fator determinante da relativa baixa velocidade é a contribuição do tipo de porosidade (intergranular). De modo geral, vê-se que as amostras que apresentam porosidade do tipo intergranular tendem a exibir menores valores de VP, em comparação com as amostras que têm porosidade predominante do tipo vugular. Comportamento semelhante foi observado para o caso da velocidade das ondas S.

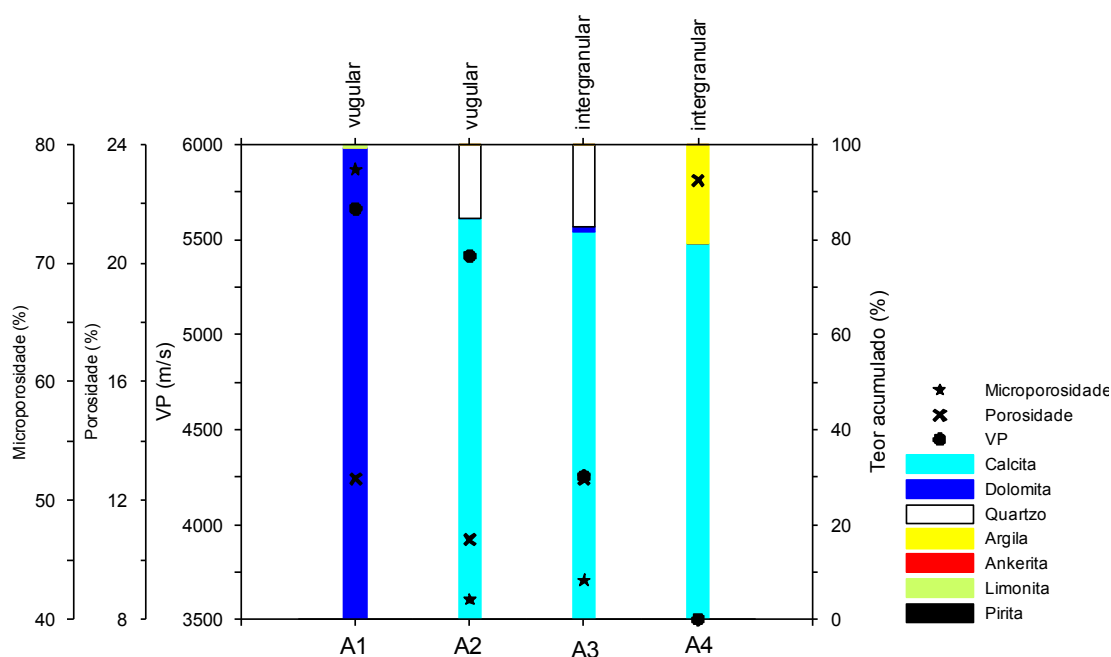


Figura 5: Relação entre a velocidade da onda P e a composição mineral, a porosidade, o tipo de porosidade e o percentual de microporosidade das amostras.

4 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi demonstrada a capacidade de se determinar a composição mineral de rochas a partir da análise de imagens de microtomografia de raios x. A análise das propriedades petrofísicas, pelo método convencional e por μ CT, permitiu comprovar a influência da composição mineral sobre as propriedades petrofísicas, especialmente a densidade e as velocidades de propagação das ondas elásticas, as quais são as principais propriedades físicas que controlam o método sísmico de prospecção.

Além da composição mineral, as variáveis que controlam as velocidades elásticas são a porosidade total, o tipo de porosidade predominante e o percentual de microporosidade. As velocidades elásticas apresentam uma relação inversa com a porosidade. O tipo de porosidade predominante em rochas carbonáticas também causa uma forte influência. Rochas com predominância de porosidade intergranular tendem a apresentar velocidades menores que as que possuem porosidade do tipo vugular. Adicionalmente, rochas com maior percentual de microporosidade tendem a apresentar velocidades elásticas também menores (no caso da amostra A1, o fator determinante para o elevado valor de VP é a composição mineral).

Os resultados indicam o forte controle da composição mineral sobre as propriedades petrofísicas das rochas carbonáticas da Bacia do Araripe. Portanto as velocidades elásticas, propriedade investigada no método sísmico de exploração, podem ser usadas com sucesso no mapeamento das fácies carbonáticas de maior potencial para o acúmulo de hidrocarbonetos.

5 REFERÊNCIAS

ASSINE, M. L. *Análise Estratigráfica da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil*. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v.22, n. 3, p. 289-300, 1992.

ASSINE, M. L. *Bacia do Araripe*. Boletim de Geociências da Petrobrás, v. 15, n. 2, p. 371-389, 2007.

CAVALCANTI, B. M., SOARES, J. A.; FREIRE, L. A.; SOUSA, W. B.; TABOSA, L.D.G. *Análise Petrofísica de Carbonatos da Formação Jandaíra, Bacia Potiguar*. 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Rio de Janeiro, 2013.

GURJÃO, K. G. R.; SOARES, J. A.; BARBOSA, J. A.; GOMES, I. F.; FIGUEIREDO, A. N. *Petrophysics of carbonatic and evaporitic rocks from Araripe Basin*. 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Rio de Janeiro, 2013.

KELLNER, A. W. A. *Membro Romualdo da Formação Santana, Chapada do Araripe, CE: Um dos mais importantes depósitos fossilíferos do Cretáceo brasileiro*. In: Sítios Paleontológicos e Geológicos do Brasil. Brasília: DNPM, v.1, p. 122-130, 2002.

NETO, J. M. M.; HEGARTY, K; KARNER, G. D. *Abordagem preliminar sobre paleotemperatura e evolução do relevo da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil, a partir da análise de traços de fissão*

em apatita. Boletim de Geociência da Petrobrás, Rio de Janeiro, v. 14, n. 1, p. 113-119, nov. 2005/maio 2006.

PONTE, F. C.; APPI, C. J; *Proposta de Revisão da Coluna Litoestratigráfica da Bacia do Araripe*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Natal. Anais Natal: Sociedade Brasileira de Geologia. p. 211-226, 1990.

SILVA, M. A. M. *Lower Cretaceous unconformity truncating evaporate-carbonate sequence, Araripe Basin, Northeastern Brazil*. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v.16, n.3, p.306-310, 1986.

SILVEIRA, A. C.; SILVA, A. C.; CABRAL, N. R. A. J.; SCHIAVETTI, A. *Análise da Efetividade de Manejo do Geopark Araripe – Estado do Ceará*. São Paulo, UNESP, Geociências, V.31, n.1, p.117-128, 2012.

RIBEIRO, G. A. V. *Estudo Petrofísico de Rochas Carbonáticas do Membro Maruim, Formação Riachuelo, Bacia de Sergipe*. Monografia submetida ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Campina Grande. 64pp, 2014.

VIDAL, A. D. *Quantificação da Macro e Micro Porosidade e sua Conectividade em Rochas Carbonáticas por Microtomografia de Raios X*. Monografia submetida ao curso de Engenharia de Petróleo da Universidade Federal de Campina Grande. 19pp, 2016.

VIDAL, F. W. H.; Sales, F.A.C.B.; Roberto, F.A.C.; Sousa, J.F.; Mattos, I.C. *Rochas e Minerais Industriais do Estado do Ceará*. Editora FUNCAP, Fortaleza, 176 pp, 2005.