

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:



ABPG
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE P&D EM
PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

PETROFÍSICA E CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DE ROCHAS CARBONÁTICAS DA
FORMAÇÃO JANDAÍRA (BACIA POTIGUAR)

AUTORES:

Mábia Ruana Silva de Sena¹, José Agnelo Soares², Isis da Silva Rodrigues³, Marcella Mayara Costa
Araújo Aragão⁴, Rayssa Lima Costa Coura⁵

INSTITUIÇÃO:

¹Unidade Acadêmica de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de
Campina Grande, ²Unidade Acadêmica de Mineração e Geologia, Universidade Federal de Campina
Grande, ³Unidade Acadêmica de Mineração e Geologia, Universidade Federal de Campina Grande,
⁴Unidade Acadêmica de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de
Campina Grande, ⁵Unidade Acadêmica de Mineração e Geologia, Universidade Federal de Campina
Grande

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.

PETROFÍSICA E CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DE ROCHAS CARBONÁTICAS DA FORMAÇÃO JANDAÍRA (BACIA POTIGUAR)

Abstract

Carbonate rocks are characterized by their high complexity, largely caused by its high degree of compositional heterogeneity. In this work, six rock samples of the Jandaíra Formation (Potiguar Basin) in order to evaluate the mineral composition of these rocks through the analysis of digital images of X-ray microtomography (μ CT) and to investigate the effect of this composition on its petrophysical properties. Petrophysical analyzes were constituted by conventional tests in plugs where was determined the porosity (ϕ), grain density (ρ_g), total density (ρ_b) and propagation velocity of the compression wave (VP) and shear (VS). The results of the mineral composition by μ CT, performed in subsamples of plugs, were compared with the results obtained by X-ray diffraction (XRD) analyzes. The results of the μ CT analysis indicate that the samples are mainly composed of calcite and / or dolomite. The results of the XRD analyzes confirmed the mineral composition indicated by μ CT, except for amorphous minerals and for those with small contents (accessory minerals). The results show that the main minerals (with higher levels) control the petrophysical properties, especially grain density and elastic velocities. However, other factors may significantly affect elastic velocities, such as porosity, type of porosity (if intergranular or vugular) and the proportion of microporosity present in the rock.

Introdução

As rochas carbonáticas ocupam, numa visão global, um expressivo volume da crosta terrestre. De maneira geral, pode-se dizer que essas rochas estão presentes nas diversas unidades litoestratigráficas que compõem a história geológica da Terra, registrando episódios de sedimentação (litogênese) química e bioquímica acontecidos desde os tempos mais antigos (Arqueano > 2.5 Ga) até os mais novos (Neógeno < 1.75 Ma). (SOUSA & VIDAL, 2005). Apresentam como componentes mineralógicos a calcita (CaCO_3), dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] e aragonita (CaCO_3), além de minerais secundários como anidrita, gipsita, siderita, quartzo, argilominerais, pirita, óxidos e sulfatos (AHR *et al.*, 2005).

De acordo com Sousa & Vidal (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 sozinhos, deterem 80% das reservas da região. Alguns dispõem de imensas jazidas de calcário sedimentar e mármore, além daqueles que encerram ambas as tipologias.

As rochas carbonáticas que são aqui estudadas pertencem à Bacia Potiguar (Formação Jandaíra). A Bacia Potiguar está localizada no extremo Nordeste do Brasil, abrangendo uma área de aproximadamente 48000 km², sendo 45% encontrados emersos e 55% submersos, englobando predominantemente o norte do estado do Rio Grande do Norte e uma pequena parte do Nordeste do Ceará. A Formação Jandaíra é constituída por uma plataforma/rampa carbonática dominada por maré, cujos sedimentos mais novos apresentam idade eocampaniana. As rochas carbonáticas da Formação Jandaíra, afloram em praticamente toda a porção emersa da Bacia Potiguar, onde se encontra intensamente erodida e carstificada, e mergulha com baixa inclinação em direção ao Oceano Atlântico. A espessura é variável desde algumas dezenas de metros na porção oeste da bacia, atingindo um valor máximo da ordem de 600 m na porção da plataforma interna atual, passando a zero em direção à água profunda por efeito de erosão ou condensação (PESSOA NETO *et al.*, 2007).

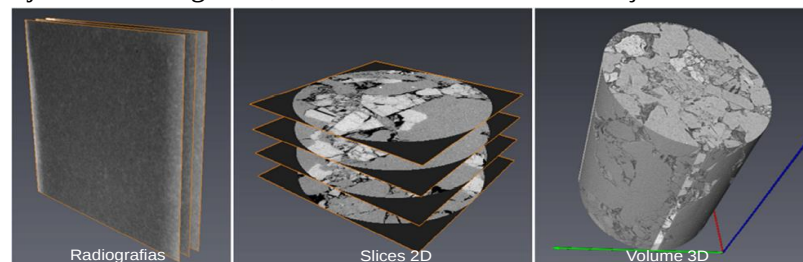
Este trabalho tem o objetivo de identificar os prováveis minerais presentes nas rochas carbonáticas da Formação Jandaíra, determinando a composição mineralógica das rochas através da análise de imagens digitais de microtomografia de raios x (μ CT) e comparando os resultados com a análise de difração de raios x (DRX), e avaliar o efeito da composição mineral com as propriedades petrofísicas dessas rochas.

Metodologia

Foram utilizadas seis amostras de rochas carbonáticas da Formação Jandaíra (P1, P2, P3, P4, P5 e P6). 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 e comparada com as análises de DRX.

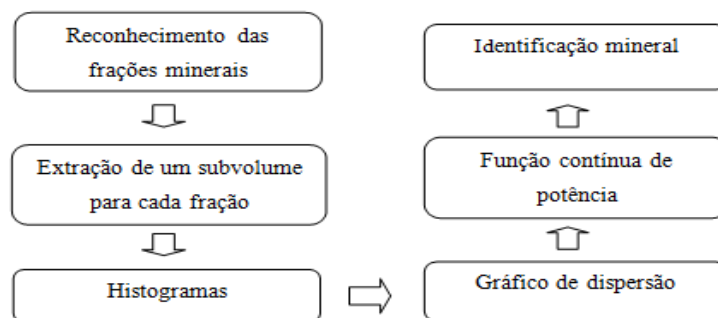
As imagens microtomográficas foram adquiridas no Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas da Universidade Federal de Santa Catarina, no equipamento XRADIA, modelo Versa XRM – 500. Este opera uma fonte de raios-x de 30 a 160 kV, potência de 2 a 10 W, trabalha com um tamanho máximo de objetos 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 (Figura 1).

Figura 1: Conjunto de radiografias, *slices* horizontais e reconstrução 3D de uma subamostra.



Fonte: PORTO, 2015.

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. O fluxograma da Figura 2 sintetiza este procedimento.

Figura 2: Fluxograma do procedimento para determinação da composição mineral por μ CT.

Na análise por DRX o método qualitativo empregado foi o do pó e o equipamento utilizado foi o SHIMADZU XRD-6000 com radiação de $\text{CuK}\alpha$, intervalo de $5^\circ \leq 2\theta \leq 80^\circ$, filtro de níquel, passo de 0,02/seg e fendas Soller. Os dados de DRX foram adquiridos no Laboratório de Caracterização de Materiais da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da UFCG.

Resultados e Discussão

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 e porosidade das amostras determinada pela análise das imagens de microtomografia de raios X.

Amostra	ϕ (%)	Fase Mineral (%)									
		C	D	Q	A	M	L	Arg	MO	FP+	FP-
P1	15,80	-	69,54	30,42	-	0,04	-	-	-	-	-
P2	3,80	36,69	-	-	-	0,02	-	-	-	21,31	41,98
P3	0,70	83,77	-	-	-	-	0,02	15,00	1,21	-	-
P4	0,12	77,55	-	-	0,002	-	-	-	-	5,61	16,84
P5	0,66	43,46	-	-	-	0,0003	-	-	-	-	56,54
P6	2,60	-	48,65	-	40,33	0,04	-	10,98	-	-	-

Legenda: C: Calcita; D: Dolomita; Q: Quartzo; A: Ankerita; M: Magnesita; L: Limonita; Arg: Argila; MO: Matéria orgânica; FP+: Fóssil mais poroso; FP-: Fóssil menos poroso.

Pode-se observar que os componentes mineralógicos essenciais de uma rocha carbonática, calcita e dolomita, foram identificados em todas as amostras analisadas. Das 6 amostras, 4 apresentaram matriz calcítica e 2 matriz dolomítica. Em níveis acessórios foram identificados 4 minerais: quartzo, ankerita, magnesita e limonita. Em algumas amostras foi identificada a presença de fósseis com porosidade variável, os quais, apesar de não se constituírem em minerais, apresentam valores próprios de densidade (devido à variação nos valores de porosidade). Adicionalmente, foram identificados teores de argila em 2 amostras e de matéria orgânica (em 1 amostra).

A análise por DRX apenas identificou a presença de minerais, sem quantificá-los, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Minerais presentes nas amostras de rochas estudadas por DRX.

Formação	Amostra	Calcita	Dolomita	Quartzo
Jandaíra (Potiguar)	P1	-	X	X
Jandaíra (Potiguar)	P2	X	-	-
Jandaíra (Potiguar)	P3	X	-	-
Jandaíra (Potiguar)	P4	X	-	-
Jandaíra (Potiguar)	P5	X	-	-
Jandaíra (Potiguar)	P6	X	X	-

X: mineral presente, -: mineral ausente.

Os minerais identificados através da análise por DRX foram: calcita, dolomita e quartzo. Não é possível a identificação de minerais com teores pequenos (traços) e elementos amorfos como a matéria orgânica.

Os resultados indicam pontos de concordância e de discordância entre os dois métodos de análise. Ambos os métodos identificaram a presença de calcita em todas as amostras analisadas (com exceção da amostra P6 que não foi identificada presença de calcita na análise por μ CT, apenas pela análise por DRX). A presença de dolomita foi identificada em 2 amostras nas análises por μ CT e DRX. A presença de quartzo foi identificado em ambos os métodos na amostra P1. Os demais minerais acessórios (ankerita, magnesita e limonita) foram identificados apenas na análise por μ CT. Os minerais de argila e a matéria orgânica, por serem potencialmente amorfos, não podem ser identificados por DRX. Os teores relativos aos fósseis, quantificados por μ CT, não são identificados como tal pelo DRX, uma vez que estes elementos são compostos por minerais, como a calcita.

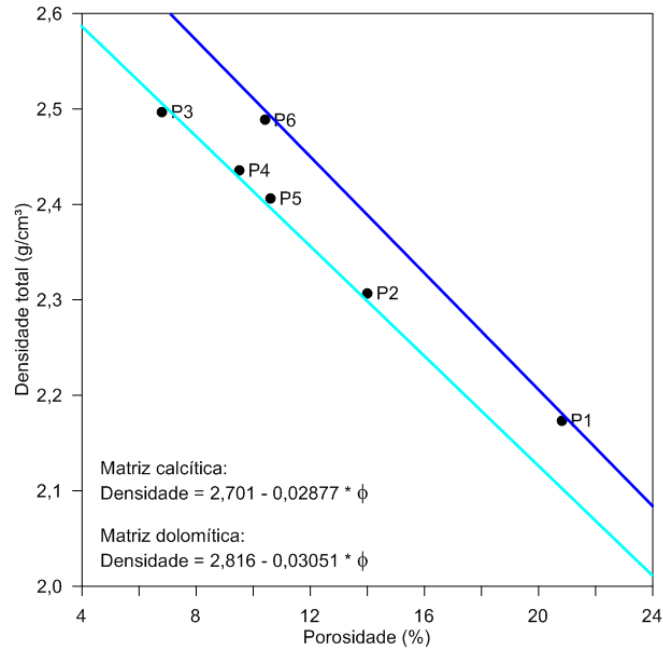
A Tabela 3 apresenta os valores medidos para as propriedades petrofísicas medidas de forma convencional em laboratório. Os ensaios petrofísicos foram realizados com as amostras secas. A porosidade e as densidades (total e de grãos) foram medidas sob pressão e temperatura ambientes, enquanto que as velocidades elásticas foram medidas sob temperatura ambiente e pressão confinante efetiva de 40 MPa.

Tabela 3: Propriedades petrofísicas medidas em laboratório.

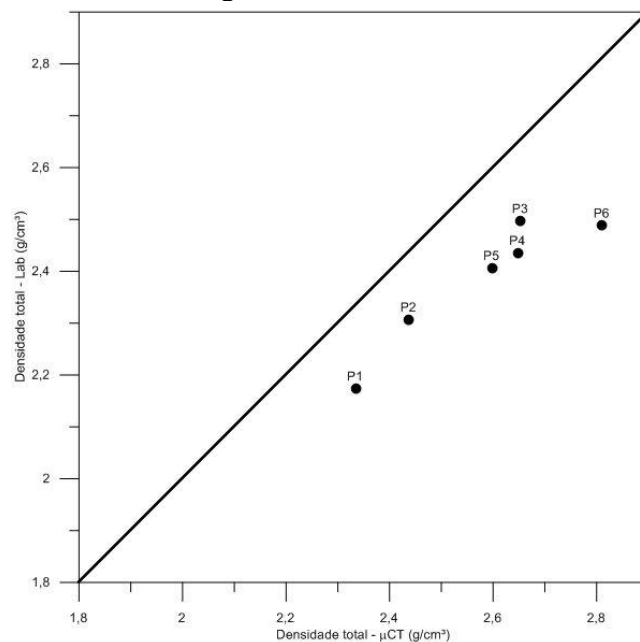
Amostra	ϕ (%)	ρ_g (g/cm ³)	ρ_b (g/cm ³)	VP (m/s)	VS (m/s)
P1	20,8	2,743	2,174	3694	2198
P2	14,0	2,682	2,307	4842	2700
P3	6,8	2,680	2,497	5463	2924
P4	9,5	2,691	2,436	5713	3068
P5	10,6	2,693	2,406	5242	2910
P6	10,4	2,773	2,488	5189	2991

Observa-se que os valores de porosidade medidos em laboratório e por μ CT divergem consideravelmente. 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 amostras 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.

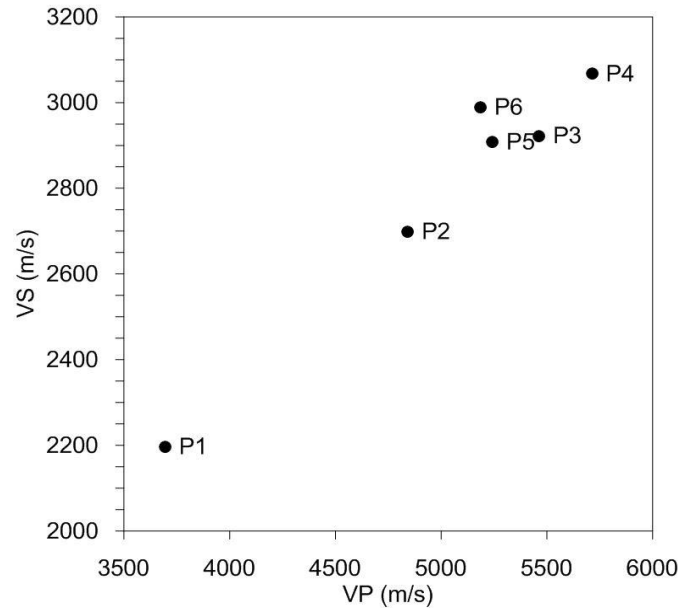
A Figura 3 apresenta a relação entre a densidade total e a porosidade medidas de forma convencional. Nesta figura são observadas duas linhas de tendência: O azul claro corresponde às amostras que apresentam matriz predominantemente calcítica, enquanto que a linha azul escuro às amostras de matriz dolomítica. 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 3: Relação entre a densidade total e porosidade.

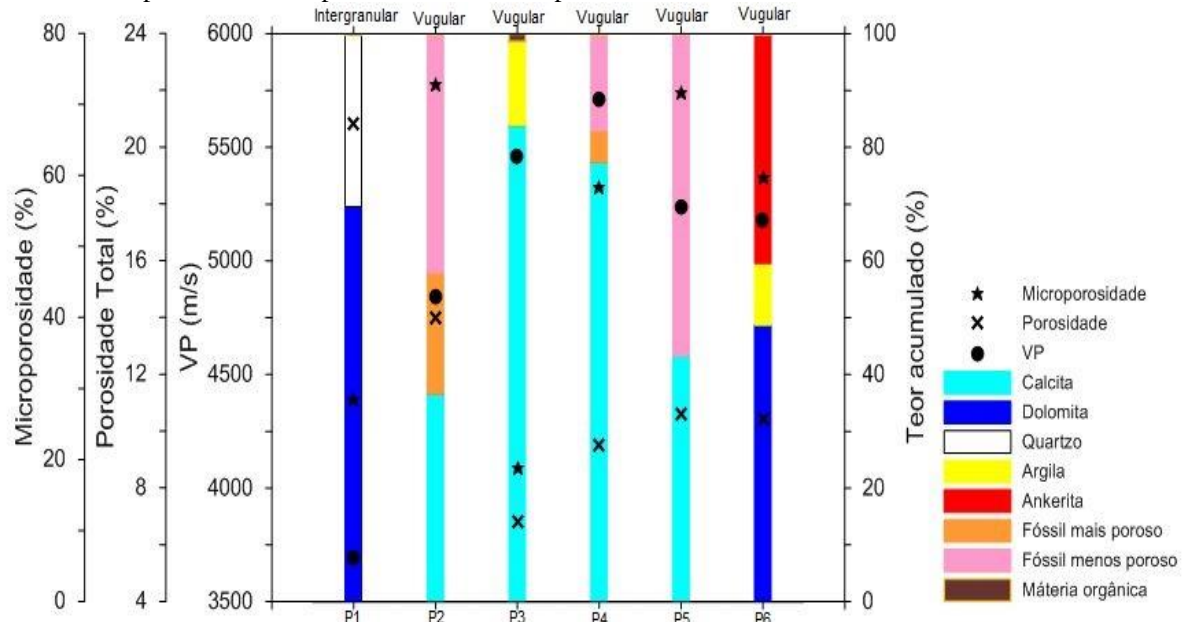
A Figura 4 apresenta a relação entre a densidade de grãos medida em laboratório e uma estimativa da densidade de grãos a partir das imagens microtomográficas. Idealmente os pontos deveriam cair sobre a diagonal positiva da figura. Vê-se que a maioria dos pontos se encontra próxima a essa diagonal; no entanto, alguns pontos estão relativamente afastados. Isso indica que para a maioria das amostras os teores minerais estimados se aproximaram dos valores reais. As amostras P2 e P5 correspondem àquelas que apresentam grande quantidade de fósseis porosos, por isso, apresentam densidade estimada substancialmente menor que a densidade medida. A amostra P6 apresentou cerca de 40% de ankerita, um mineral de densidade maior do que a dolomita, por esta razão a densidade de grãos estimada foi superior à medida.

Figura 4: Relação entre a densidade de grãos medida em laboratório e a estimada por μ CT.

A Figura 5 apresenta a relação entre as velocidades de propagação das ondas P e S medidas sob pressão confinante de 40 MPa. Observa-se uma relação linear entre estas propriedades, independente do tipo de matriz.

Figura 5: Relação entre as velocidades VP e VS medidas sob pressão confinante efetiva de 40MPa.

A Figura 6 apresenta a relação entre a velocidade da onda P e a composição mineral (por μ CT), a porosidade, 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. No caso da amostra P1 esta relação não se mantém. Neste caso a variável dominante é a porosidade (alta porosidade determina a baixa velocidade). 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 6: Relação entre a velocidade da onda P e a composição mineral, a porosidade, o tipo de porosidade e o percentual de microporosidade das amostras.

Conclusões

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 qual foi confirmada pela análise de

difração 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 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, 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 vulgular. Adicionalmente, rochas com maior percentual de microporosidade apresentam velocidades elásticas também menores.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao convenio PETROBRAS/UFCG “Petrofísica convencional e digital de rochas carbonáticas do nordeste brasileiro” pelo suporte financeiro e permissão para publicação destes resultados.

Referências Bibliográficas

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.

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.

PESSOA NETO, O. C.; SOARES, U. M.; SILVA, J.G. F.; ROESNER, E. H.; FLORENCIO, C. P.; SOUZA, C. A. V. **Bacia Potiguar**. Boletim de Geociência da Petrobrás, Rio de Janeiro, v. 15, n.2, p. 4, maio/nov. 2007.

PORTO, A. L. **Estimação de propriedades petrofísicas de rochas sedimentares a partir de imagens microtomográficas de raios-x**. Tese de doutorado, Centro de Ciências e tecnologia, programa de pós-Graduação em engenharia de processos, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), 2015.

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

SOUSA, J. F.; VIDAL, F. W. H. **Rochas Carbonáticas**, Centro de tecnologia mineral (CETEM), Rio de Janeiro, 2005.

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.