



## Efeito da composição mineral de rochas carbonáticas sobre as propriedades petrofísicas.

Mábia Ruana Silva de Sena, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

José Agnelo Soares\*, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Copyright 2016, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

*Este texto foi preparado para a apresentação no VII Simpósio Brasileiro de Geofísica, Ouro Preto, 25 a 27 de outubro de 2016. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do VII SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.*

### Resumo

The construction of digital models from a set of x-ray tomography images of high resolution ( $\mu$ CT) acquired in rock samples is an innovative technique in growing use nowadays. The objectives of this study is demonstrate the potential of this technique to quantify mineral content of 15 carbonate rock samples from northeastern Brazil, through ( $\mu$ CT) analysis, calibrate the results with the analysis of X-ray diffraction (XRD), and evaluate the effect of this mineral composition on the petrophysical properties of these rocks. The results achieved in the simulation of the mineral composition indicate that samples are mainly composed of calcite and or dolomite. In general the XRD results confirmed the mineral composition indicated by  $\mu$ CT, except for amorphous minerals and those with small contents (accessory minerals). The results show the content of major minerals controlling the petrophysical properties, especially grain density and elastic velocities. However, other factors may significantly affect elastic velocities, as porosity, porosity type (vugular or intergranular) and microporosity quantity.

### 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 sozinhos, deterem 80% das reservas da região. Alguns dispõem de imensas jazidas de calcário

sedimentar e outros de calcário cristalino (metamórfico), além daqueles que encerram ambas as tipologias.

As rochas carbonáticas do nordeste brasileiro que são aqui estudadas pertencem às bacias Potiguar (Formação Jandaíra), Araripe (Formação Santana) e Sergipe – Alagoas (Formação Riachuelo). A Formação Jandaíra é constituída de rochas de idade cretácica. As ocorrências de maior interesse são as camadas homogêneas e compactas, praticamente horizontais e contínuas, as quais apresentam colorações claras, variando nas tonalidades creme, bege e amarelada. A Formação Santana, de origem marinha/lacustre apresenta uma sequência sedimentar estratificada, quase horizontal, com siltitos argilosos, margas com concreções calcárias e bancos calcários, gipsita, calcários laminados, siltitos e folhelhos betuminosos. Esta formação ocorre por quase toda a totalidade dos municípios de Nova Olinda e Santana do Cariri, no Ceará. Exibem tonalidades claras, incluindo a creme, bege, amarela e cinza (VIDAL *et al*, 2005). A Formação Riachuelo representa a primeira manifestação marinha da bacia de Sergipe - Alagoas. Apresenta três membros, denominados Angico, Maruim e Taquari. O membro Angico é composto por rochas siliciclásticas. O membro Maruim corresponde a uma rampa carbonática instalada numa área de menor aporte sedimentar da bacia, constituída por calcarenitos oolíticos e oncolíticos dolomitizados. Por fim, o membro Taquari, é constituído por calcilitos e folhelhos, os quais se associam aos contextos de lagunas e talude da bacia (CAMPOS NETO *et al.*, 2007).

Este trabalho tem o objetivo de identificar os prováveis minerais presentes nas rochas carbonáticas do nordeste brasileiro, determinando a composição mineralógica das rochas através da análise de imagens digitais de microtomografia de raios x ( $\mu$ CT), calibrando 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 15 amostras de rochas carbonáticas: 5 da Formação Riachuelo, 4 da Formação Santana e 6 da Formação Jandaíra. A Tabela 1 lista as amostras de rochas.

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  $\mu$ 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 ( $\phi$ ), densidade de grãos ( $\rho_g$ ), densidade total ( $\rho_b$ ), velocidade de propagação da onda compressional (VP) e cisalhante (VS). A caracterização mineralógica foi realizada através da análise de imagens de  $\mu$ CT e calibrada por DRX.

**Tabela 1:** Identificação das amostras de rochas e suas respectivas formações.

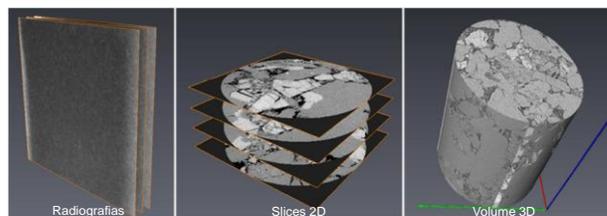
Amostra	Formação
A1	Santana (Araripe)
A2	
A3	
A4	
SA1	Riachuelo (Sergipe-Alagoas)
SA2	
SA3	
SA4	
SA5	
P1	Jandaíra (Potiguar)
P2	
P3	
P4	
P5	
P6	

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 $\mu$ 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.

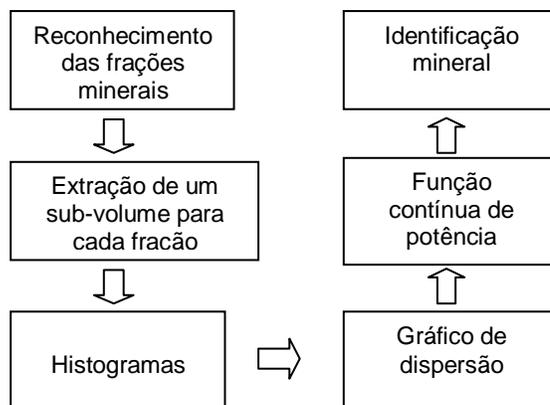
Os dados do microtomógrafo são registrados na forma de projeções do objeto, em diversos ângulos, sobre o detector plano, obtendo as chamadas radiografias. Em seguida essas radiografias passam por um processo de reconstrução a fim de gerar os tomogramas bidimensionais (*slices*), os quais quando empilhados, geram uma imagem tridimensional do objeto imageado (Figura 1).

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



**Figura 2:** Fluxograma do procedimento para determinação da composição mineral por  $\mu$ 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

A análise por microtomografia forneceu a identificação e a quantificação dos minerais presentes nas amostras de rochas, de acordo com a Tabela 2 (final do trabalho).

Pode-se observar que os componentes mineralógicos essenciais de uma rocha carbonática, calcita e dolomita, foram identificados em todas as amostras analisadas. Das 15 amostras, 11 apresentaram matriz calcítica e 4 matriz dolomítica (ver Tabela 2). Em níveis acessórios foram identificados 7 minerais: quartzo, ankerita, anortita,

magnesita, limonita, pirita e gipso. 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 4 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 3.

**Tabela 3:** Composição Mineral por DRX.

Amostras	Calcita	Dolomita	Quartzo	Pirita
A1	X	X	X	X
A2	X	X	-	-
A3	X	-	-	-
A4	X	X	-	-
SA1	X	-	-	-
SA2	X	X	X	-
SA3	X	X	X	-
SA4	X	-	X	-
SA5	X	-	X	-
P1	-	X	X	-
P2	X	-	-	-
P3	X	-	-	-
P4	X	-	-	-
P5	X	-	-	-
P6	X	X	-	-

X: mineral presente, -: mineral ausente

Os minerais identificados através da análise por DRX foram: calcita, dolomita, quartzo e pirita. 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 das amostras A1 e P6 que não foi identificada presença de calcita na análise por  $\mu$ CT, apenas pela análise por DRX). A presença de dolomita foi identificada em 7 amostras nas análises por  $\mu$ CT e DRX, existindo discordância nas amostras A3 e SA3. Enquanto a análise por  $\mu$ CT identificou quartzo nas amostras A2, A3, SA3, SA4, SA5 e P1, a análise por DRX identificou esse mineral apenas nas amostras A1, SA2, SA3, SA4, SA5 e P1. Na amostra A1 foi identificada a presença de pirita por ambos os métodos. Os demais minerais acessórios (ankerita, anortita, magnesita, limonita e gipso) foram identificados apenas na análise por  $\mu$ 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  $\mu$ CT, não são identificados como tal

pelo DRX, uma vez que estes elementos são compostos por minerais, como a calcita.

A Tabela 4 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.

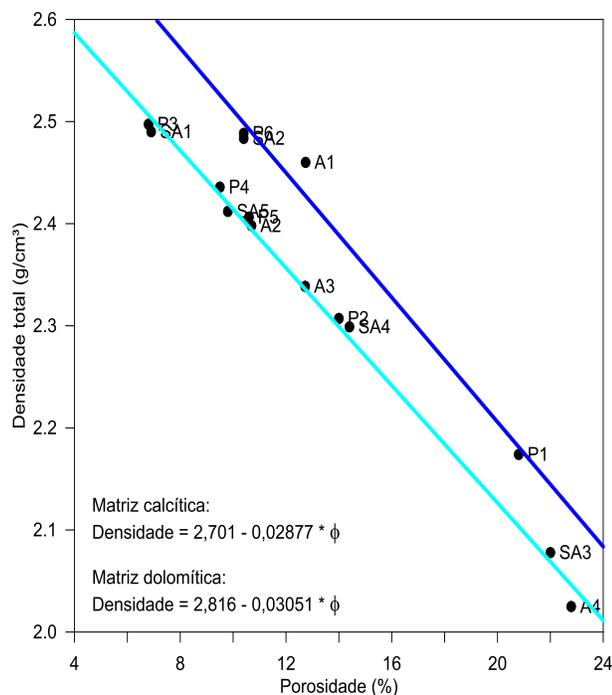
**Tabela 4:** Propriedades petrofísicas medidas em laboratório.

Amostra	$\phi$ (%)	$\rho_g$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_b$ (g/cm <sup>3</sup> )	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
SA1	6,9	2,675	2,490	5512	2955
SA2	10,4	2,771	2,484	4598	2374
SA3	22,0	2,665	2,078	3666	2156
SA4	14,4	2,685	2,299	4301	2494
SA5	9,8	2,675	2,412	4991	2814
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  $\mu$ CT divergem consideravelmente. Com exceção da amostra A4, os valores de porosidade medidos por  $\mu$ CT são muito menores do que aqueles medidos de forma convencional em laboratório. Isto acontece devido a vários fatores. A porosidade por  $\mu$ 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  $\mu$ 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  $\mu$ 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.

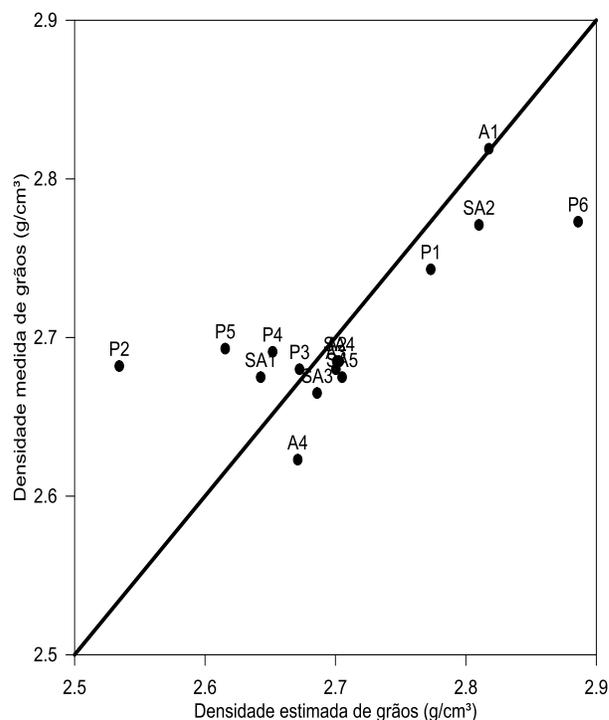
A Figura 3 apresenta a relação entre a densidade total e a porosidade medidas de forma convencional. Nesta figura são observadas duas linhas de tendência: A azul claro corresponde às amostras que apresentam matriz predominantemente calcítica, enquanto que a linha azul escuro às amostras de matriz dolomítica.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



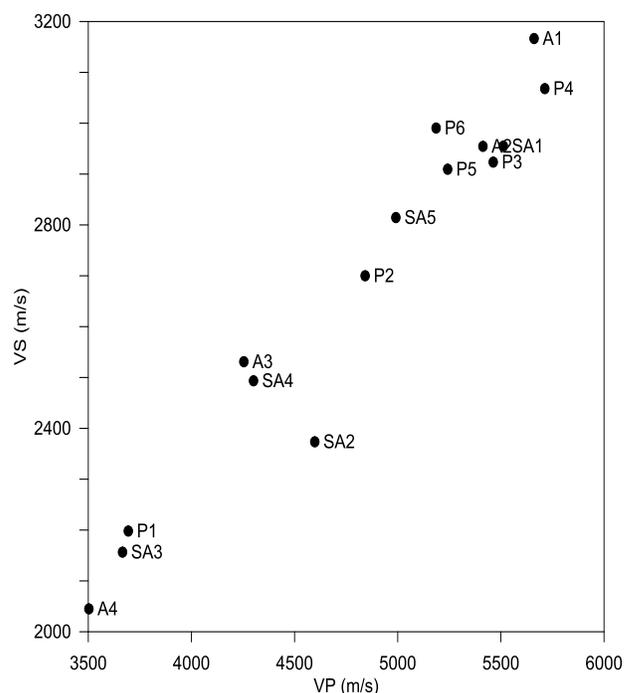
**Figura 3:** Relação entre densidade total e porosidade.

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.

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 4:** Relação entre a densidade de grãos medida em laboratório e a estimada por  $\mu$ CT.



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

A Figura 6 apresenta a relação entre a velocidade da onda P e a composição mineral, 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 (observar as amostras SA3, SA4, SA5, A1 e A2). No caso das amostras A4 e P1 esta relação não se mantém. Neste caso a variável dominante é a porosidade (alta porosidade determina a baixa velocidade). As velocidades das amostras SA2 e A3 ainda não podem ser explicadas pela composição mineral e pela porosidade. Para a amostra SA2 o fator determinante da relativa baixa velocidade é o alto percentual de microporosidade, enquanto que no caso da amostra A3 há também 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 vulgular. Comportamento semelhante foi observado para o caso da velocidade das ondas S.

### 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  $\mu$ 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, 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/UFMG "Petrofísica convencional e digital de rochas carbonáticas do nordeste brasileiro" pelo suporte financeiro e permissão para publicação destes resultados.

### Referências

Campos Neto, O.P.A.; Lima, W.S.; Cruz, F.E.G., 2007. Bacia de Sergipe - Alagoas. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, vol. 15, n. 2, p. 405-415.

Cavalcanti, B.M., Soares, J.A.; Freire, L.A.; Sousa, W.B.; Tabosa, L.D.G., 2013. Análise Petrofísica de Carbonatos da Formação Jandaíra, Bacia Potiguar. 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Rio de Janeiro.

Gurjão, K.G.R.; Soares, J.A.; Barbosa, J.A.; Gomes, I.F.; Figueiredo, A.N., 2013. Petrophysics of carbonatic and evaporitic rocks from Araripe Basin. 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Rio de Janeiro.

Ribeiro, G.A.V., 2014. 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.

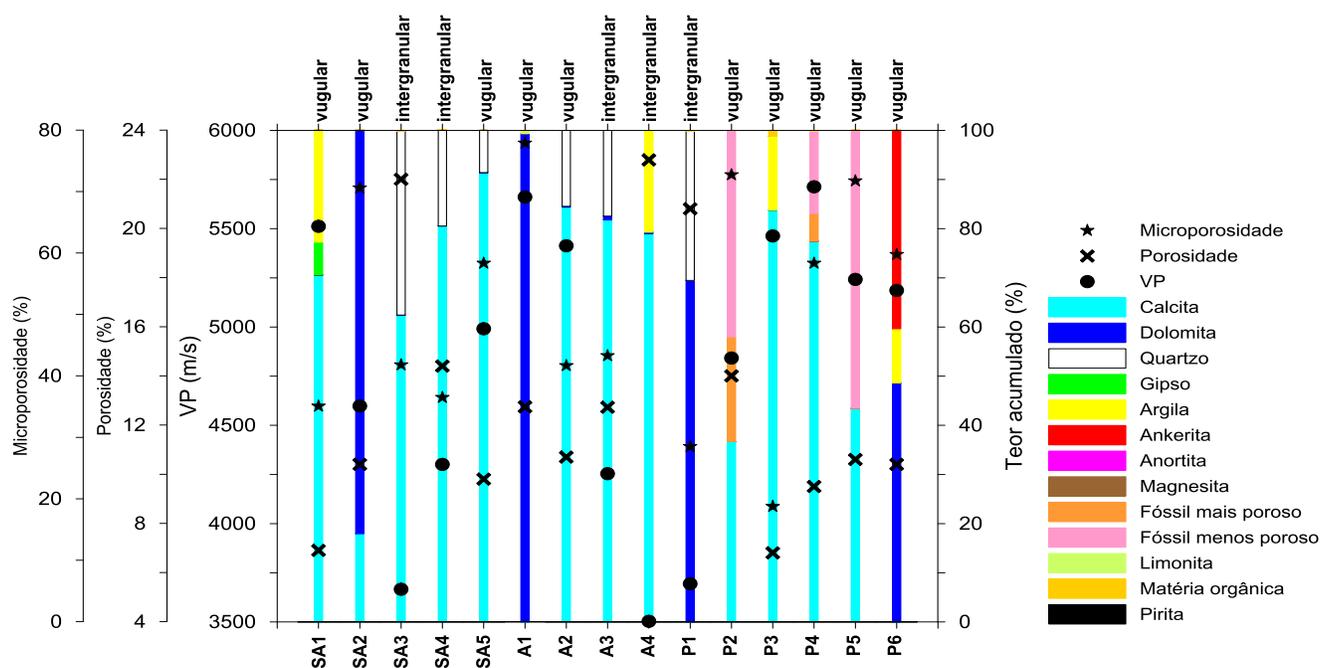
Vidal, A.D., 2016. Quantificação da Macro e Micro Porosidade e sua Conectividade em Rochas Carbonáticas por Microtomografia de Raios X. Monografia submetida ao curso de Engenharia de Petróleo da Universidade Federal de Campina Grande. 19pp

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

**Tabela 2:** Composição mineral das amostras determinada pela análise das imagens de micrografia de raios x.

Amostra	$\phi$ (%)	Fase mineral (%)												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
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	17,43	0,005	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A4	31,92	79,00	0,32	-	-	-	-	-	-	20,68	-	-	-	-
SA1	2,80	70,57	-	-	0,02	-	-	-	6,68	22,73	-	-	-	-
SA2	1,30	17,90	82,05	-	0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SA3	4,20	62,46	-	37,39	-	0,15	-	-	-	-	-	-	-	-
SA4	0,80	80,40	-	19,53	-	0,07	-	-	-	-	-	-	-	-
SA5	0,01	91,40	-	8,60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
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:** 1: Calcita; 2: Dolomita; 3: Quartzo; 4: Ankerita; 5: Anortita; 6: Magnesita; 7: Limonita; 8: Gipso; 9: Argila; 10: Matéria orgânica; 11: Pirita; 12: Fóssil mais poroso; 13: Fóssil menos poroso.



**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.