



## Petrofísica de tufas carbonáticas da Formação Jandaíra, Bacia Potiguar.

Araújo, A.M.M.<sup>1</sup>; Soares, J.A.<sup>1</sup>; Dias, C.H.<sup>1</sup>; Ribeiro, G.A.V.<sup>1</sup>; Medeiros, L.C.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Campina Grande

Copyright 2013, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 13<sup>th</sup> 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 13<sup>th</sup> 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.

### Resumo

Neste trabalho são apresentadas as propriedades petrofísicas medidas em amostras de tufas da Formação Jandaíra, que ocorre na porção oeste da Bacia Potiguar. As propriedades analisadas são a porosidade, a densidade de grãos e as velocidades das ondas elásticas. As amostras de rocha foram coletadas em campo, com o auxílio de uma plugadeira manual, obtendo-se assim, plugues que foram preparados e descritos em laboratório, secos e submetidos aos ensaios sob temperatura ambiente e pressões confinantes efetivas de até 10 MPa. Os resultados obtidos mostram que a densidade de grãos está mais próxima da do quartzo do que da do carbonato de cálcio, indicando que a composição das tufas pode estar fortemente influenciada por teores de matéria orgânica e sílica, ou haja uma quantidade não desprezível de porosidade não interconectada. Uma relação linear confiável foi estabelecida entre a densidade total e a porosidade. Os valores de porosidade medidos variam de 28% a 60%. As velocidades de propagação das ondas P e S foram medidas com os plugues secos e sob pressões de confinamento de 5 e 10 MPa. Em geral, as velocidades, assim como os módulos elásticos, apresentam redução de valores com o aumento da porosidade, exceto no caso da razão de Poisson, que é sensível a outros fatores.

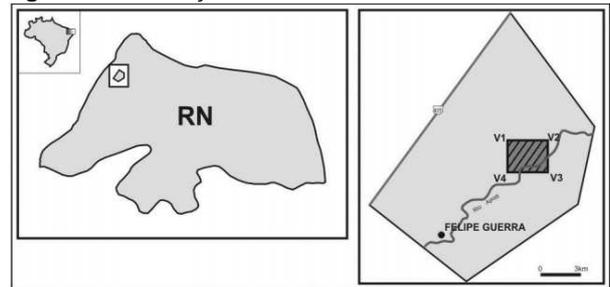
### Introdução

Segundo Ford e Pedley (1996) as tufas são variedades de calcários formados em águas com temperatura ambiente, sob condições climáticas diversas. Tais depósitos diferenciam-se dos travertinos por apresentarem restos de bactérias, plantas ou animais, com grau de cimentação e idade variados, além dos travertinos serem formados em águas termais. O desenvolvimento das tufas de acordo com Suguio (2003), está associado a fenômenos cársticos, controlados por fatores morfológicos, hidrogeológicos, hidroquímicos, biológicos e climáticos. A precipitação bioquímica da calcita em tufas é regulada pelo conteúdo de CO<sub>2</sub>, pela pressão, pela temperatura e pela fotossíntese.

### Localização

A área de estudo se concentra em Felipe Guerra, município no estado do Rio Grande do Norte, localizado na microrregião da Chapada do Apodi.

Figura 1: Localização da área estudada.



Fonte: Gomes, *et al.* (2011).

### Aspectos Geológicos

De acordo com Françolin e Szatmari (1989) a Bacia Potiguar é uma bacia sedimentar do tipo *rift* originada pela fragmentação do supercontinente Gondwana, que teve início ao final do Jurássico, estando sua origem diretamente ligada a formação do Atlântico Sul. Estende-se por 48.000 km<sup>2</sup> de área e engloba parte dos estados do Rio Grande do Norte e Ceará. Corresponde a uma transição entre o continente e o oceano, com porção emersa de 21.500 km<sup>2</sup> e submersa de 26.500 km<sup>2</sup>, até a isóbata de 2.000 m. Desenvolveu-se sobre um substrato de rochas pré-cambrianas pertencentes à Província Borborema, limitando-se ao sul e oeste com rochas do embasamento cristalino, ao norte e leste com o Oceano Atlântico.

### Propriedades petrofísicas investigadas

As análises petrofísicas aqui apresentadas foram realizadas no Laboratório de Petrofísica da UFCG. As propriedades até o momento investigadas foram porosidade, densidade de grãos, densidade total e velocidades elásticas.

A medição da porosidade foi realizada utilizando o equipamento UltraPoroPerm 500<sup>®</sup>, fornecido pela Corelab, o qual se utiliza do método da porosimetria por expansão gasosa (Tiab & Donaldson, 2004). No ensaio de porosidade foi utilizado um *matrix cup* que permite estimar a porosidade a partir da medição do volume de grãos. Com o auxílio de uma balança de precisão foi medida também a densidade de grãos. Para a medição das velocidades elásticas foi utilizado o sistema AutoLab 500<sup>®</sup>, fornecido pela New England Research, o qual permite registrar simultaneamente três formas de onda: a onda P, que se propaga e possui polarização na direção axial do plugue, e duas ondas S com direções de polarização mutuamente ortogonais e perpendiculares ao eixo do plugue: S<sub>1</sub> e S<sub>2</sub>. Uma descrição sucinta dos equipamentos utilizados é apresentada por Soares *et al.* (2012).

Durante os ensaios elásticos o sistema de pressão de poros foi mantido aberto para a pressão ambiente e os ensaios foram realizados à temperatura ambiente. Portanto, a única variável ambiental durante os ensaios elásticos foi a pressão confinante, a qual variou no intervalo de 5 a 10 MPa. A secagem das amostras é uma condição necessária para os ensaios de porosidade e de densidade de grãos.

### Pesquisa de campo

Foi realizada uma pesquisa de campo, que teve como objetivo obter as amostras necessárias para as análises petrofísicas. A área de origem das amostras se encontra no município de Felipe Guerra – RN, na bacia potiguar. A Figura 2 apresenta um dos afloramentos dos quais as amostras foram retiradas na superfície do terreno. O elevado grau de porosidade dessas rochas, as quais ocorrem preferencialmente em zonas de cavernas colapsadas, é devido à dissolução do calcário causada pela ação da percolação de águas subterrâneas.

**Figura 2:** Exemplo de afloramento de onde foram extraídas as amostras de tufa analisadas neste trabalho.



### Preparação de plugues

As amostras foram retiradas *in situ* com o auxílio de uma plugadeira manual (Figura 3a). Ao chegar ao laboratório as amostras foram delimitadas verticalmente até o comprimento aproximado de 5 cm, em seguida há o desbaste radial, objetivando obter o diâmetro de 1,5". As extremidades dos plugues de rocha (Figura 3b) foram preparadas para garantir superfícies planas, perfeitamente polidas, paralelas entre si e perpendiculares ao eixo do cilindro. O polimento das extremidades tem como objetivo o perfeito acoplamento dos plugues aos cabeçotes metálicos dos equipamentos de análise, como a câmara de propagação de ondas elásticas, evitando assim, perdas de amplitude por acoplamento irregular.

### Análises laboratoriais

Após a secagem, pesagem e medição das dimensões dos plugues, foram realizados os ensaios no permoporosímetro a gás. Nestes ensaios foi utilizado o

*matrix cup*. Com o uso do *matrix cup* mede-se o volume de grãos do plugue. A diferença entre o volume total e o volume de grãos consiste no volume de vazios da amostra. Para calcular a porosidade basta determinar a razão entre o volume de vazios e o volume total.

**Figura 3:** Equipamento usado na extração dos plugues.



Uma vez que a amostra se encontra seca pode-se assumir que a sua massa corresponde à massa de sua fase sólida, sendo a densidade de grãos dada pela razão entre a massa do plugue e o volume de grãos medido. Com a porosidade e a densidade de grãos pode-se estimar a densidade total da rocha desprezando a densidade do ar que preenche os poros da rocha. Alternativamente, a densidade total pode ser estimada simplesmente pela razão entre a massa e o volume da amostra.

O volume de grãos é medido pela expansão do nitrogênio contido em uma câmara no interior do permoporosímetro. Nesta câmara, de volume conhecido  $V_1$ , mede-se a pressão  $P_1$  na qual o gás se encontra comprimido. Em seguida permite-se que o gás se expanda através de uma conexão ao *matrix cup*, de volume  $V_2$  também conhecido, o qual contém o plugue. Após a estabilização da expansão do gás, mede-se a pressão  $P_2$ . A queda de pressão dada pela diferença  $P_1 - P_2$  é proporcional ao volume  $V$  ocupado pelo gás:  $V = V_1 + V_2 - V_G$  onde  $V_G$  é o volume de grãos do plugue. Aplicando a Lei de Boyle e considerando que  $V_G$  é a única incógnita, este parâmetro pode ser determinado de forma direta.

Os ensaios de propriedades elásticas foram realizados através da medição do tempo de trânsito da transmissão direta de ondas P e S através do comprimento axial dos plugues analisados. Para isto foi utilizado o sistema Autolab500<sup>®</sup>. Este equipamento permite realizar ensaios sob condições controladas de pressão confinante, de poros, temperatura e saturação fluida. Neste trabalho as medições das velocidades das ondas P e S foram realizadas em plugues secos e submetidos a níveis decrescentes de pressão confinante entre 5 e 10 MPa. Uma vez conhecido o comprimento de cada plugue e determinados os tempos de trânsito das ondas, as suas velocidades de propagação são dadas pela razão entre estes parâmetros.

A partir das velocidades de propagação das ondas P e S e da densidade total dos plugues, pode-se calcular os módulos elásticos: módulo de elasticidade (E), incompressibilidade (K), módulo de cisalhamento (G) e razão de Poisson ( $\nu$ ).

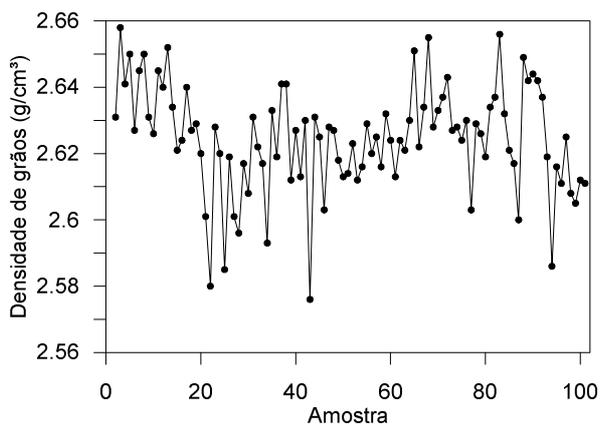
As velocidades elásticas foram medidas sob pressão efetiva entre 5 e 10 MPa e a porosidade foi medida a pressão ambiente. Para examinar a variação das velocidades com a porosidade sob níveis elevados de pressão foi calculada a variação da porosidade sob pressões de até 10 MPa.

A estimativa da porosidade sob 10 MPa de pressão confinante foi obtida através da estimativa da redução do volume de poros. Esta pode ser obtida considerando a incompressibilidade do plugue sob 10 MPa de pressão confinante, a qual foi obtida a partir das velocidades e da densidade total medidas.

## Resultados

A Figura 4 apresenta valores de densidade de grãos medidos em 100 amostras de tufas analisadas. Nesta figura pode-se observar que a densidade de grãos está em torno de  $2,57 \text{ g/cm}^3$  a  $2,66 \text{ g/cm}^3$ . Estes valores são substancialmente inferiores aos esperados para amostras carbonáticas, cuja densidade de grãos esperada fica em torno de  $2,7 \text{ g/cm}^3$ . Supõe-se que estes valores menores que o esperado se deve a três possíveis fatores: 1) presença de matéria orgânica; 2) ocorrência de poros não interconectados ou 3) enriquecimento diagenético por sílica após a dissolução preferencial do carbonato de cálcio.

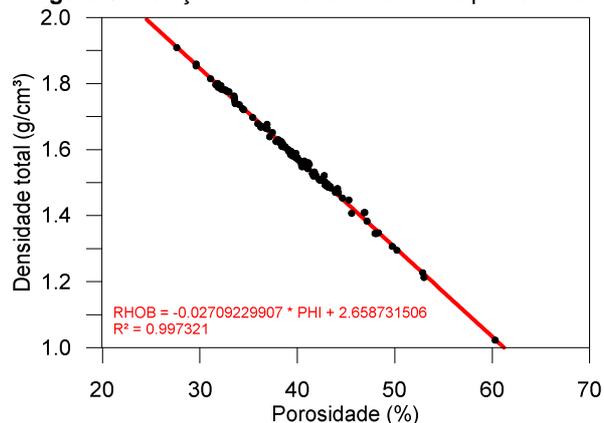
**Figura 4:** Densidade de grãos das amostras analisadas.



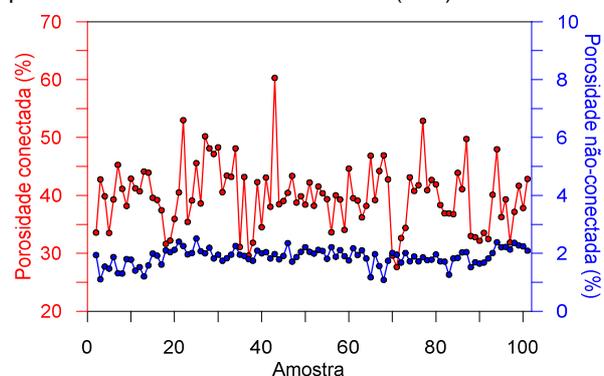
A Figura 5 apresenta a relação linear entre a densidade total e a porosidade, obtida através da regressão, a qual foi obtida pela análise dos resultados de cem plugues analisados de tufa carbonática.

Supondo que os baixos valores de densidade de grãos são devidos unicamente à ocorrência de porosidade não conectada, este tipo de porosidade foi estimada. Esta estimativa foi obtida pela diferença entre a porosidade estimada considerando uma densidade de grão de  $2,7 \text{ g/cm}^3$  e a porosidade medida. A Figura 6 apresenta os valores medidos de porosidade conectada (eixo ordenado da esquerda) e os valores estimados de porosidade não conectada (eixo ordenado da direita). Observa-se que a porosidade não conectada estimada para as amostras analisadas se encontra em torno de 1% a 2%.

**Figura 5:** Relação entre densidade total e porosidade.



**Figura 6:** Porosidade conectada medida (vermelho) e porosidade não conectada estimada (azul).

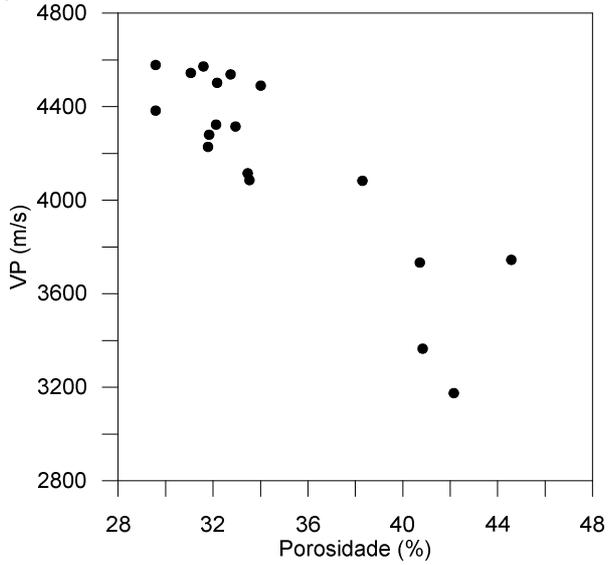


Para as amostras apresentadas neste trabalho os valores medidos de porosidade se encontram no intervalo de 28% a 60%. Valores tão elevados de porosidade ocorrem em poucos materiais naturais, sendo que o caráter cárstico das tufas permitem tal comportamento. Um fato decorrente destes valores muito elevados de porosidade é que tais amostras não suportam pressões de confinamento muito elevadas, sendo esta a causa das medições de velocidades elásticas terem sido efetuadas a pressões confinantes limitadas a 10 MPa.

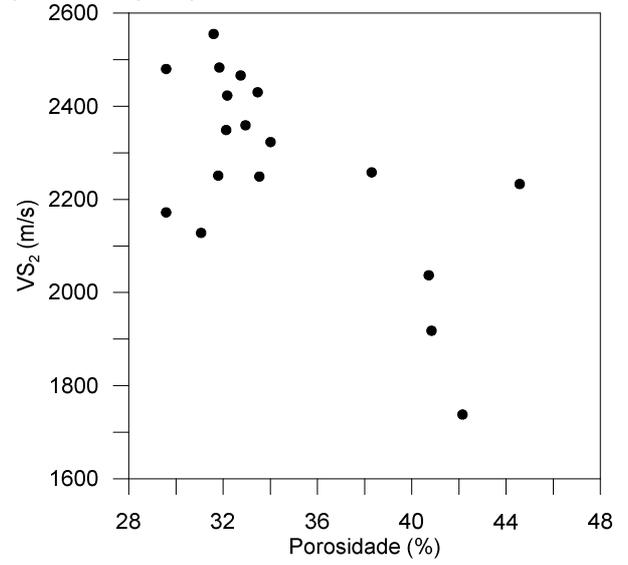
As velocidades elásticas foram medidas, até o momento, em 18 amostras de tufas. Foram escolhidas amostras com baixa, média e alta porosidade. A Figura 7 apresenta relações entre velocidade de onda P e porosidade para os plugues sob confinamento de 10 MPa. De modo semelhante, as Figuras 8 e 9 apresentam resultados similares para as velocidades das ondas  $S_1$  e  $S_2$ . É possível notar que à medida que a porosidade aumenta as velocidades decrescem.

As Figuras 10, 11, 12 e 13 apresentam os módulos elásticos medidos sob pressão confinante efetiva de 10 MPa nos 18 plugues analisados. Analisando estas figuras pode-se inferir que em geral com o aumento da porosidade tem-se um decréscimo no valor dos módulos elásticos, exceto para a razão de Poisson, que apresenta um comportamento dependente de outras variáveis.

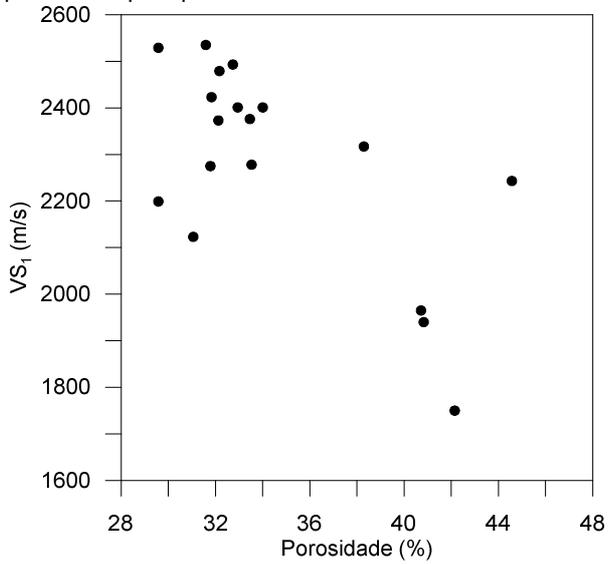
**Figura 7:** Relação entre velocidade P e porosidade para pressão confinante efetiva de 10 MPa.



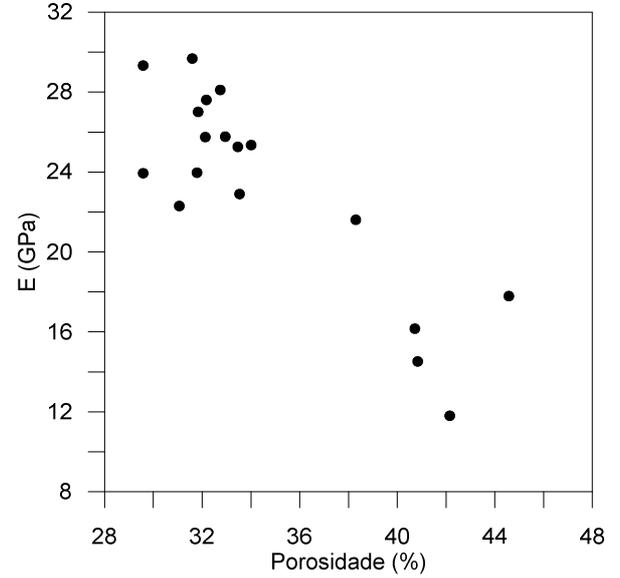
**Figura 9:** Relação entre velocidade da onda S<sub>2</sub> e porosidade para pressão confinante efetiva de 10 MPa.



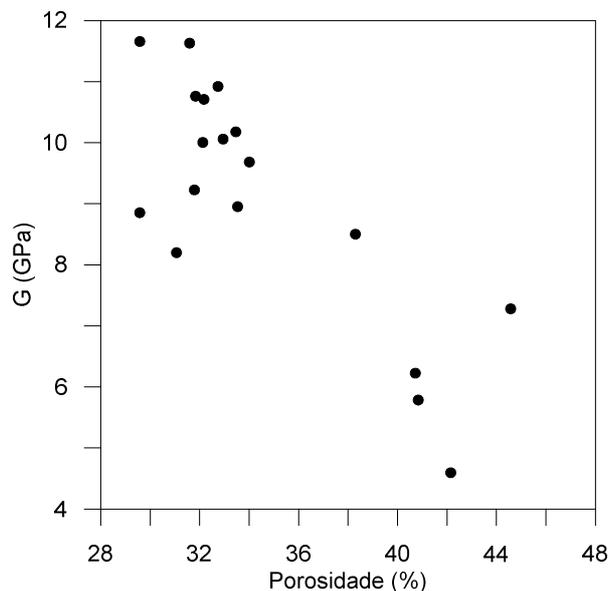
**Figura 8:** Relação entre velocidade da onda S<sub>1</sub> e porosidade para pressão confinante efetiva de 10 MPa.



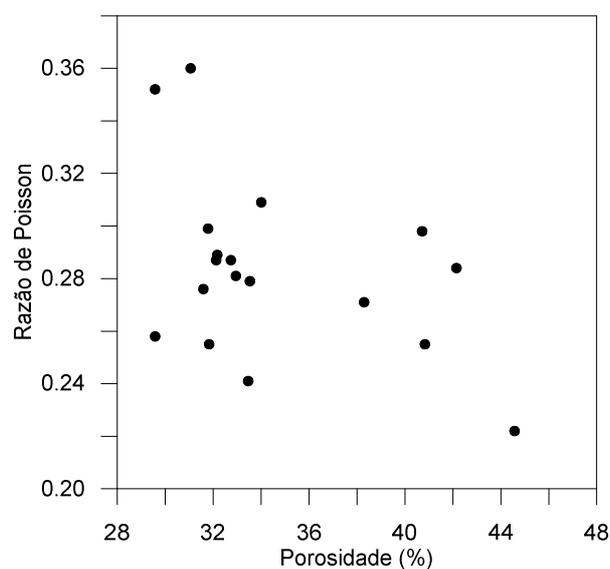
**Figura 10:** Relação entre o módulo de Young (E) e a porosidade para pressão confinante efetiva de 10 MPa.



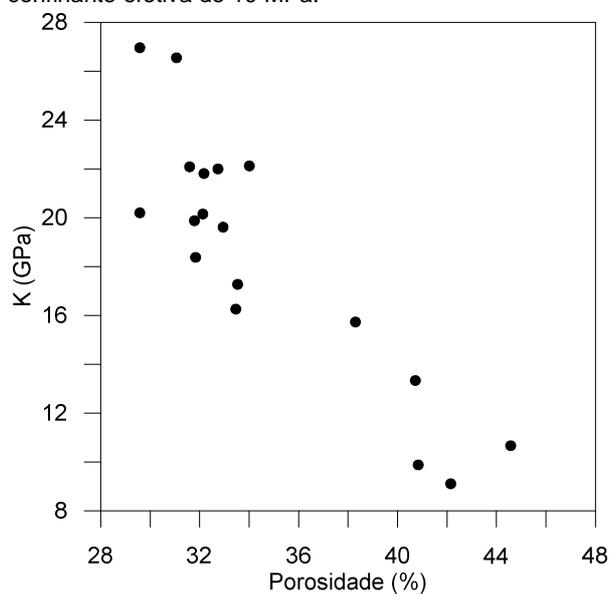
**Figura 11:** Relação entre o módulo de Cisalhamento (G) e a porosidade para pressão confinante efetiva de 10 MPa.



**Figura 13:** Relação entre a Razão de Poisson ( $\nu$ ) e a porosidade para pressão confinante efetiva de 10 MPa.



**Figura 12:** Relação entre o módulo de incompressibilidade (K) e a porosidade para pressão confinante efetiva de 10 MPa.



A fim de permitir a utilização das propriedades medidas neste trabalho por outros grupos de pesquisa, a Tabela 1 lista os valores medidos.

**Tabela 1:** Propriedades petrofísicas de 18 amostras de tufa sob pressão confinante de 10 MPa. PHI é a porosidade, RHOB é a densidade total e RHOG é a densidade de grãos.

Amostra	VP (m/s)	VS <sub>1</sub> (m/s)	VS <sub>2</sub> (m/s)	PHI (%)	RHOB (g/cm <sup>3</sup> )	RHOG (g/cm <sup>3</sup> )
A_CR1A_08	3175	1750	1738	42.1	1.511	2.634
A_CR1A_10	4280	2423	2483	31.8	1.788	2.625
A_CR2B_08	4490	2401	2323	34.0	1.736	2.632
A_CR2G_03	3733	1965	2037	40.7	1.554	2.624
A_CR2H_01	3365	1940	1918	40.8	1.554	2.629
A_CR2H_04	4083	2317	2258	38.3	1.624	2.634
A_CR2HI_10	4115	2376	2430	33.5	1.762	2.651
A_CR2V_02	4538	2493	2466	32.7	1.776	2.642
A_CR2B_09	3745	2243	2233	44.6	1.453	2.624
A_CR2D_01	4502	2479	2423	32.2	1.782	2.629
A_CR2D_02	4228	2275	2251	31.8	1.801	2.641
A_CR2D_03	4086	2278	2249	33.5	1.747	2.631
A_CR2D_11	4578	2199	2172	29.6	1.854	2.633
A_CR2HI_01	4544	2123	2128	31.1	1.814	2.633
A_CR2HI_03	4572	2535	2555	31.6	1.796	2.627
A_CR2HI_04	4383	2529	2480	29.6	1.859	2.641
A_CR2V_01	4315	2401	2359	32.9	1.775	2.649
A_CR2V_03	4323	2373	2349	32.1	1.794	2.644

## Conclusões

Propriedades petrofísicas de tufas carbonáticas da Formação Jandaíra (bacia Potiguar) foram medidas no Laboratório de Petrofísica da UFCG com êxito. Para as amostras apresentadas neste trabalho os valores medidos de porosidade se encontram no intervalo de 28% a 60%.

As velocidades elásticas das amostras de tufa carbonática, medidas em amostras secas, apresentam uma correlação inversa com a porosidade, ou seja, decrescem monotonicamente com o aumento da porosidade. De modo semelhante, os módulos elásticos diminuem de forma consistente com o aumento da porosidade, exceto a razão de Poisson, que depende de outras variáveis.

Os valores de densidade de grãos medidos para as amostras analisadas de tufa se mostraram substancialmente menores que os esperados para uma rocha de matriz carbonática. Este fato pode ser devido à presença de matéria orgânica, devido à ocorrência de porosidade não conectada, ou ainda um enriquecimento silicoso devido à dissolução preferencial do carbonato de cálcio. Supondo que a segunda hipótese é a verdadeira, estimou-se a porosidade não conectada entre 1% e 2%.

Uma relação linear bastante representativa foi estabelecida entre a densidade total e a porosidade de cem plugues de tufas.

Utilizando o módulo de incompressibilidade das amostras e supondo que a compactação sofrida com o aumento da pressão confinante se dá essencialmente no espaço poroso, a porosidade da rocha sob pressão confinante de 10 MPa foi estimada.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao convênio PETROBRAS/UFCG TC 0050.0057323.10.9 pelo financiamento da pesquisa e à PETROBRAS pela permissão para a publicação destes resultados.

## Referências

FORD, T.D & PEDLEY, H.M. (1996). A review of tufa and travertine deposits of the world. *Earth-Science Reviews* 41, p. 117-175.

GOMES, I. P.; VERISSÍMO, C. U.; BEZERRA, F.H. (2011). As fraturas e sua importância no controle da paisagem cárstica em calcários da Formação Jandaíra (cretácio da Bacia Potiguar), Felipe Guerra – RN. *Anais do 31º Congresso Brasileiro de Espeleologia*. Ponta Grossa - PR.

SOARES, J.A.; NOGUEIRA, F.C.C.; TABOSA, L.D.G.; ALMEIDA, H.A.; CAVALCANTI, B.M.; SOUZA, F.M.; GURJÃO, K.G.R.; FREIRE, L.A.; RIBEIRO, G.A.V. ; SOUSA, W.B.; DIAS, C.H; LIMA, P.H.A.; ARAÚJO, A.M.M. (2012). *Petrofísica da Bacia do Rio do Peixe: resultados preliminares*. Anais do V Simpósio Brasileiro de Geofísica. Salvador, Bahia.

SUGUIO, K. (2003). *Geologia Sedimentar*. 1ª Edição. São Paulo. Editora Edgard Blucher.

TIAB, D.; DONALDSON, E.C. (2004). *Petrophysics. Theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties*. Elsevier.