



## Análise Petrofísica de Carbonatos da Formação Jandaíra, Bacia Potiguar.

Cavalcanti, B.M.<sup>1</sup>; Soares, J.A.<sup>1</sup>; Freire, L.A.<sup>1</sup>; Sousa, W.B.<sup>1</sup>; Tabosa, L.D.G.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Campina Grande, <sup>2</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte

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

Este trabalho apresenta as propriedades petrofísicas de calcários, dolomitas e caliches da Formação Jandaíra (bacia Potiguar). As propriedades analisadas são a porosidade, as densidades de grão e total, e as velocidades de propagação das ondas elásticas. Os módulos elásticos são derivados das velocidades e da densidade total. As amostras de rocha foram coletadas em afloramentos na forma de amostras de mão, preparadas na forma de plugues, secas em estufa, e ensaiadas sob temperatura ambiente. Os ensaios de porosidade e densidade de grãos foram realizados sob pressão ambiente enquanto que os ensaios elastodinâmicos foram realizados com as amostras sob pressão confinante entre 5 e 40 MPa. Os resultados alcançados indicam que há a ocorrência de dois tipos de matriz carbonática: uma predominantemente calcária e outra mais dolomítica. A relação entre a densidade total e a porosidade depende do tipo de matriz; enquanto que as propriedades elastodinâmicas são pouco afetadas pelo tipo de matriz e mais por processos de alteração da rocha sã ou pela composição mineral, como a presença de argilominerais ou matéria orgânica.

### Aspectos geológicos da bacia Potiguar

A bacia Potiguar situa-se no extremo leste da margem equatorial brasileira ao longo dos estados do Ceará e do Rio Grande do Norte. É uma bacia tipo rifte, formada a partir do neojurássico, durante a separação das placas sul-americanas e africana. Sua origem está ligada a formação do oceano Atlântico sul e está relacionado a uma série de bacias neocomianas, intracontinentais, que compõem o sistema de riftes do nordeste brasileiro (MATOS, 1992).

Em sua seção cretácica ocorre a Formação Jandaíra, uma plataforma carbonática de idade santoniana. Seis afloramentos da Fm Jandaíra, localizados na região de Apodi (RN), foram visitados e deles extraídos amostras de mão para posterior preparação de plugues e análise petrofísica. A Figura 1 apresenta um mapa de localização desses afloramentos.

Neste trabalho são analisadas as propriedades petrofísicas de 23 amostras de rochas carbonáticas, mais

especificamente compostas por calcários, dolomitas e caliches. O caliche é um tipo de solo formado pela alteração do substrato rochoso carbonático em regiões semi-áridas. Um perfil de alteração típico inclui zonas de menor consistência mecânica, chamadas simplesmente de caliche, e zonas mais endurecidas, conhecidas como crosta endurecida ou *hardpan*. Esta crosta endurecida se forma pela cristalização da calcita e outros minerais devido ao movimento ascendente da umidade em virtude do excesso de evaporação e da ação da capilaridade (SUGUIO, 2003).

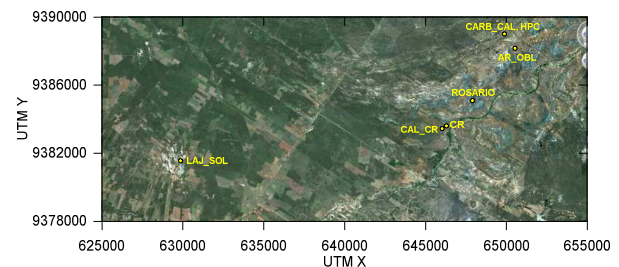


Figura 1 – Localização dos afloramentos visitados dos quais as amostras de rocha foram extraídas.

### Preparação de amostras

Devido a exigências construtivas dos equipamentos disponíveis no Laboratório de Petrofísica da UFCG, os plugues de rocha necessitam de uma preparação prévia, de modo que fiquem com forma cilíndrica e com dimensões de 1,5 polegada de diâmetro e com altura aproximada de 5 centímetros.

Tal preparação consiste na serragem das amostras de mão coletadas em afloramento, extração de plugues em plugadeira de bancada, retificação das extremidades dos plugues, de modo a garantir faces planas e perfeitamente paralelas. A Figura 2 apresenta os equipamentos utilizados na preparação dos plugues.



Figura 2 - a) Serra; b) Plugadeira; c) Retificadora de plugues.

Terminada esta primeira fase, o plugue é colocado numa estufa para ser secado por 24 horas a uma temperatura de 80 graus Celsius. Por fim, as dimensões dos plugues

são medidas com um paquímetro digital e os mesmos são pesados em balança de precisão semi-analítica.

### Ensaio de porosidade e de densidade de grãos

A fase de análises laboratoriais tem início com a medição da porosidade e da densidade de grãos em permoporosímetro a gás. A amostra é colocada dentro do *matrix cup* onde é medido seu volume de grãos e, a partir deste, calculada sua porosidade e sua densidade de grãos. A Figura 3 exibe os equipamentos utilizados na medição da porosidade e da densidade de grãos e total.



Figura 3 - a) Permoporosímetro; b) *Matrix cup*; c) Balança semi-analítica.

A análise de porosidade e densidade de grãos em permoporosímetro a gás se baseia na lei de Boyle, a qual indica que, em sistemas fechados e sem variação de temperatura, o produto entre o volume de gás e a sua pressão se mantém constante antes e após a interligação de dois subsistemas (teoria dos vasos comunicantes).

Inicialmente se permite que o gás ocupe um depósito interno do permoporosímetro cujo volume  $V_1$  é conhecido, fecha-se a entrada de gás, e mede-se a pressão  $P_1$  na qual o gás se encontra comprimido. Um plugue de volume  $V$  é inserido no *matrix cup* juntamente com discos de aço cuja função é reduzir o espaço do *matrix cup* não preenchido pelo plugue. Em seguida uma válvula é aberta permitindo a expansão do gás ao *matrix cup* e, após um curto período de estabilização, uma nova pressão  $P_2$  é medida. Devido à expansão do gás,  $P_2$  será sempre menor que  $P_1$  e o volume agora ocupado pelo gás será  $V_2 = V_1 + V_{MC} - V_{DISCOS} - V_{GR\tilde{A}OS}$ . Aplicando a Lei de Boyle e considerando que  $V_{GR\tilde{A}OS}$  é a única incógnita, este parâmetro pode ser determinado de forma direta.

A diferença entre o volume de grãos e o volume total da amostra consiste no volume de vazios. Para se calcular a porosidade da amostra basta dividir o volume de vazios pelo volume total da amostra. Por sua vez, a densidade de grãos é dada pela razão entre a massa do plugue e o seu volume de grãos.

### Ensaio elastodinâmicos

Estes ensaios visam medir as velocidades de propagação das ondas P,  $VS_1$  e  $VS_2$  nos plugues de rocha. Para isto é utilizado o sistema Autolab500<sup>®</sup> exibido na Figura 4. Este sistema permite realizar medições sob condições controladas de pressão confinante, pressão de poros e temperatura. Basicamente o que se mede é o tempo de trânsito de transmissão direta das ondas elásticas através do comprimento axial das amostras. No

entanto, as formas completas de onda são registradas, de modo que se pode também estimar propriedades de atenuação, como o fator de qualidade.

Os ensaios aqui relatados foram realizados com as amostras secas, sob temperatura e pressão de poros nas condições normais do ambiente, e com a pressão confinante inicialmente elevada a 40 MPa e, após um período de estabilização, realizadas as medições sob decréscimos de 5 MPa na pressão confinante, até uma pressão mínima de 5 MPa.



Figura 4 - Sistema Autolab500<sup>®</sup> usado para a medição das propriedades elásticas das rochas.

Conhecido o comprimento de cada plugue e determinados os tempo de trânsito de cada tipo de onda, 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, foram calculados os módulos elásticos: módulo de elasticidade (E), incompressibilidade (K), módulo de cisalhamento (G) e razão de Poisson ( $\nu$ ). As expressões para o cálculo dos módulos elásticos são derivadas da teoria geral da elasticidade e se encontram descritas na literatura (SHERIFF, 1991; SOARES, 1992).

### Resultados

A Figura 5 apresenta os valores de densidade de grãos medidos nas amostras analisadas. Nesta figura observa-se que há um grupo de amostras com densidade de grãos em torno de 2,7 g/cm<sup>3</sup>, que é aproximadamente a densidade da calcita, composto por amostras dos afloramentos AR\_OBL, CARB\_CAL, HPC, CR e ROSÁRIO. Por outro lado existe outro grupo de amostras que apresenta densidade de grãos em torno de 2,8 g/cm<sup>3</sup>, próximo da densidade da dolomita, e que é composto por amostras dos afloramentos CR, CAL\_CR e LAJ\_SOL.

De acordo com a densidade de grãos, vê-se que as amostras provenientes da parte norte da região estudada possuem matriz majoritariamente calcária, enquanto que nas amostras da porção sul predomina matriz dolomítica. Adicionalmente, o processo de alteração sofrido pelo

caliche e *hardpan* resultou em densidades de grãos levemente inferiores as de suas respectivas rochas sãs.

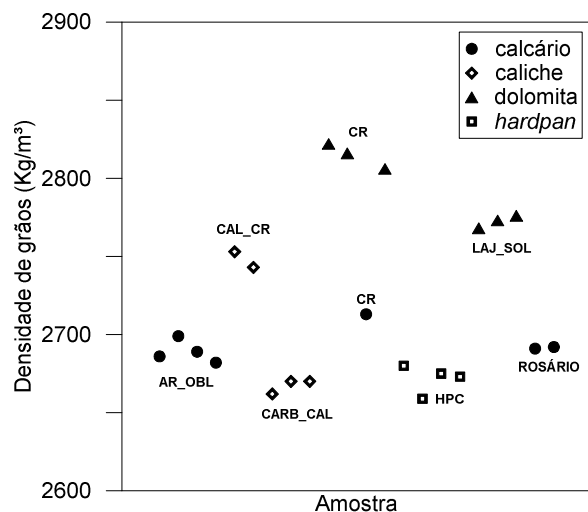


Figura 5 - Densidade de grãos das amostras analisadas.

A Figura 6 apresenta a relação entre a densidade total (matriz mais fluido contido nos poros) e a porosidade. Desta figura observa-se claramente a ocorrência de duas linhas de tendência, uma para as amostras de matriz calcária (linha azul) e outra para as amostras de matriz predominantemente dolomítica (linha vermelha). São apresentadas ainda as expressões das regressões lineares obtidas para ambos os tipos de amostras, as quais apresentam coeficientes de determinação acima de 0,9. É importante ressaltar que estas relações são válidas para amostras secas; no entanto, conhecendo-se as densidades da matriz e do fluido, expressões equivalentes podem ser facilmente determinadas para o caso saturado.

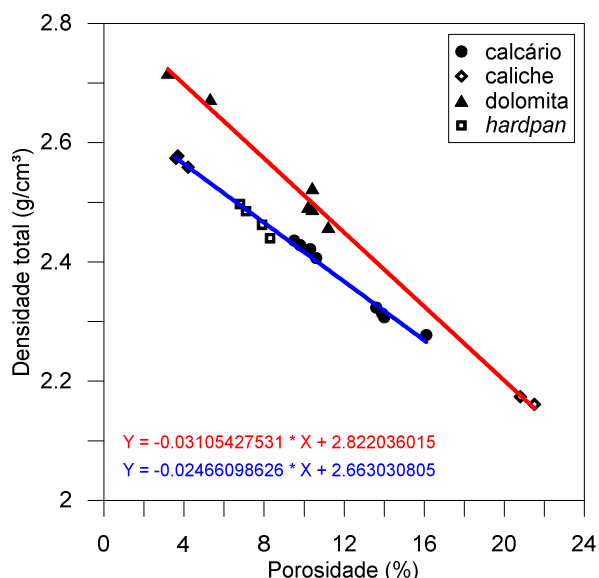


Figura 6 – Relação entre a densidade total e a porosidade. A regressão linear em azul é para as amostras de matriz calcária e a em vermelho para amostras de matriz dolomítica.

A Figura 7 apresenta a relação entre a porosidade e a velocidade de propagação da onda P (VP) medida sob 40 MPa de pressão confinante efetiva. De modo geral observa-se que VP decresce de forma consistente com o aumento da porosidade. A regressão linear apresentada quantifica essa variação, tanto para amostras de matriz calcária quanto dolomítica.

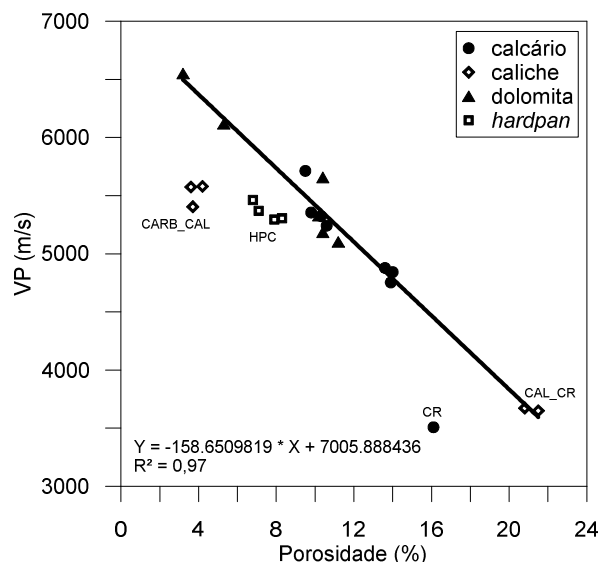
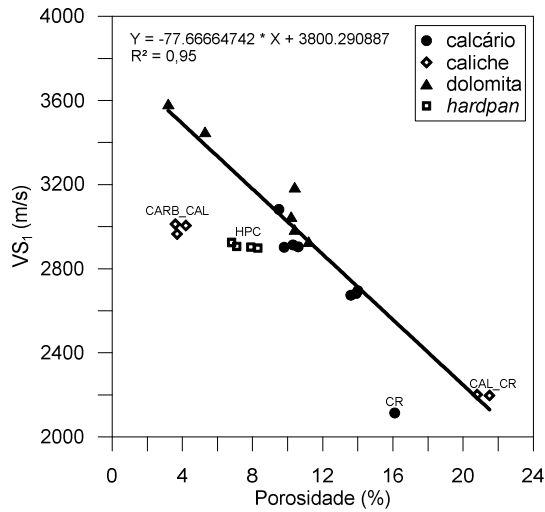


Figura 7 - Relação entre porosidade e VP medida sob 40 MPa de pressão confinante efetiva.

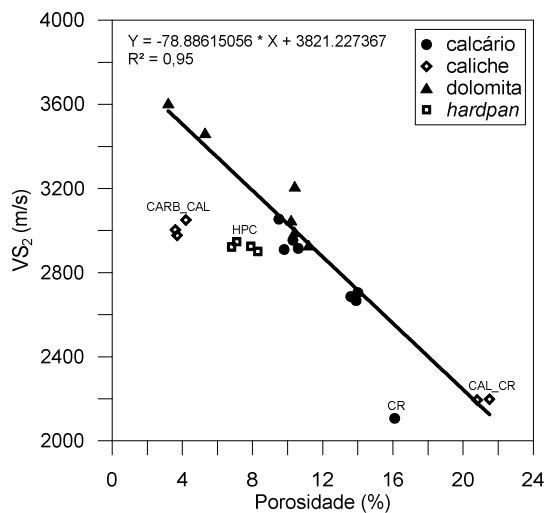
As amostras alteradas de caliche e *hardpan* provenientes do afloramento mais ao norte (CARB\_CAL, HPC), de matriz majoritariamente calcária, apresentam VP abaixo da linha de regressão. Isto indica que o processo de alteração da rocha sã afetou a sua rigidez. Uma das amostras do afloramento CR também apresenta VP muito abaixo do esperado. Essa amostra é a mesma que apresenta densidade de grão muito inferior a das demais amostras CR, conforme se pode ver na Figura 5. Isto pode ser uma indicação que essa amostra possui uma composição diferente das demais, provavelmente mais rica em matéria orgânica ou argilominerais. Por outro lado, as amostras de caliche provenientes do afloramento CAL\_CR, de matriz dolomítica, apresentam valores de VP compatíveis com a linha de regressão, a qual foi determinada sem considerar as amostras que apresentam valores de VP excessivamente baixos.

Medidas de velocidade de propagação da onda S - na direção do eixo das amostras - foram realizadas com direções de polarização mutuamente perpendiculares. Deste modo, em cada amostra foram obtidos dois valores de VS: VS<sub>1</sub> e VS<sub>2</sub>. A Figura 8 apresenta a relação entre os valores de VS<sub>1</sub>, medidas sob 40 MPa de pressão confinante efetiva, e a porosidade. De modo semelhante à Figura 7, observa-se um decréscimo consistente de VS<sub>1</sub> com o aumento da porosidade. As mesmas amostras que apresentam valores de VP abaixo do esperado também apresentam valores de VS<sub>1</sub> abaixo da linha de regressão, o que confirma ser um efeito relativo à alteração mecânica ou de composição mineral daquelas amostras de rocha. Comportamento semelhante se

observa em relação à  $VS_2$ , conforme apresentado na Figura 9.



**Figura 8** - Relação entre porosidade e  $VS_1$  medida sob 40 MPa de pressão confinante efetiva.



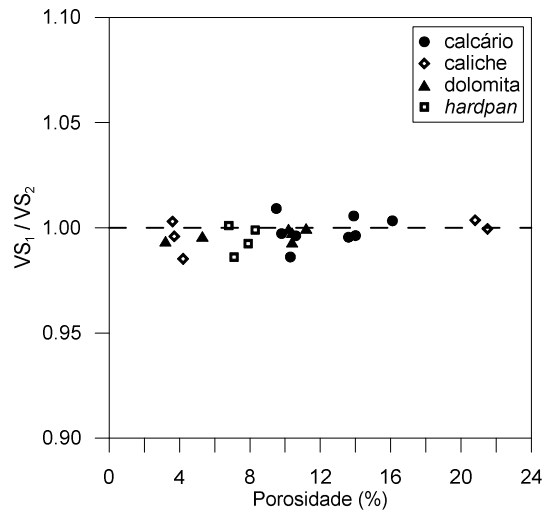
**Figura 9** - Relação entre porosidade e  $VS_2$  medida sob 40 MPa de pressão confinante efetiva.

A análise de anisotropia, através da razão  $VS_1/VS_2$ , apresentada na Figura 10, indica um grau de anisotropia muito baixo, limitado a 2%, sem uma clara relação com a porosidade.

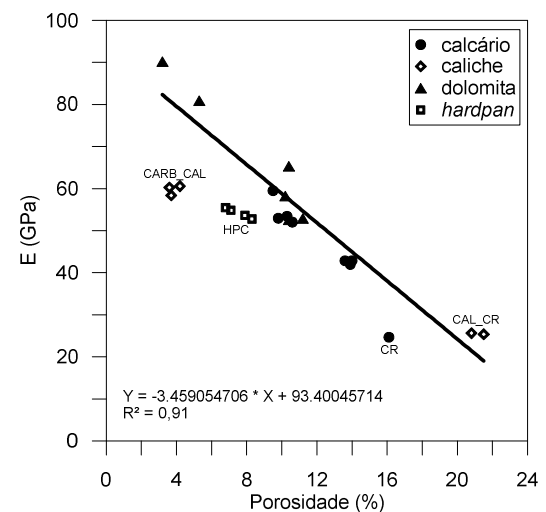
Os módulos elásticos das amostras secas foram determinados a partir da densidade total e das velocidades das ondas P e  $S_1$ . As figuras 11 a 14 apresentam as relações entre a porosidade e os módulos de elasticidade e de cisalhamento, a incompressibilidade e a razão de Poisson, respectivamente.

A Figura 11 mostra que o módulo de elasticidade das rochas da Fm Jandaíra apresenta uma forte correlação inversa com a porosidade. Isto é esperado, pois o aumento de porosidade provoca uma redução na resistência uniaxial da amostra. A função de regressão linear apresentada não leva em consideração os valores

apresentados pelas amostras de caliche do afloramento CARB\_CAL, de *hardpan* do afloramento HPC, e uma amostra de calcário do afloramento CR, pelas mesmas razões apresentadas na discussão da Figura 7. A função de regressão linear obtida indica que, sob 40 MPa de pressão confinante efetiva, o módulo de elasticidade para rochas secas da Fm Jandaíra varia de 93 GPa, para rochas de porosidade próximas de zero, para cerca de 24 GPa, para rochas com porosidade em torno de 20%.

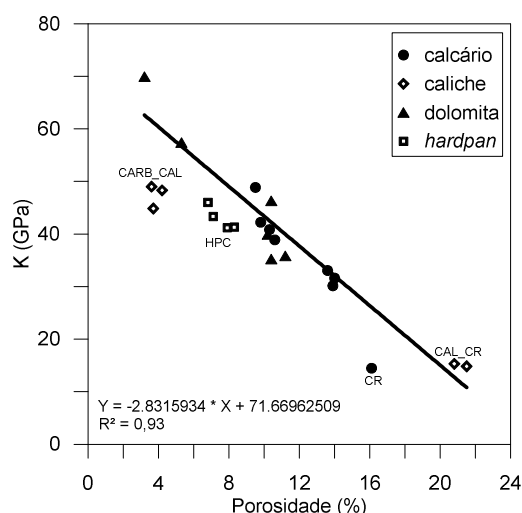


**Figura 10** - Relação entre a razão  $VS_1/VS_2$  - medida sob 40 MPa de pressão confinante efetiva - e a porosidade. A anisotropia está limitada a 2% para qualquer nível de porosidade.



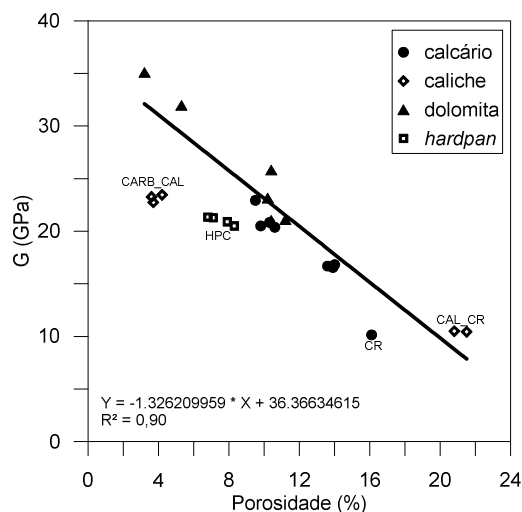
**Figura 11** - Relação entre porosidade e módulo de elasticidade para rochas secas da Fm Jandaíra sob pressão confinante efetiva de 40 MPa.

A Figura 12 apresenta a relação obtida entre a porosidade e a incompressibilidade medida sob 40 MPa de pressão efetiva. Desconsiderando as amostras que apresentam propriedades elásticas muito inferiores ao comportamento padrão das rochas sãs, observa-se que a incompressibilidade diminui fortemente com o aumento da porosidade, variando de cerca de 70 GPa, para uma rocha com porosidade próxima de zero, para 15 GPa em uma rocha com porosidade igual a 20%.



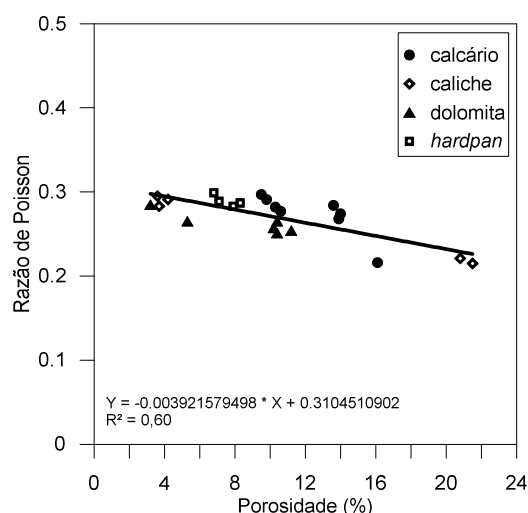
**Figura 12** - Relação entre porosidade e incompressibilidade para rochas secas da Fm Jandaíra sob pressão confinante efetiva de 40 MPa.

Os módulos de cisalhamento das rochas da Fm Jandaíra também apresentam uma correlação inversa com os valores de porosidade. A Figura 13 apresenta esta correlação para amostras secas e sob pressão confinante efetiva de 40 MPa. A função de regressão apresentada, que também desconsidera as amostras com propriedades elásticas excessivamente baixas, indica que os módulos de cisalhamento variam desde 10 GPa, para uma rocha com porosidade em torno de 20%, até 36 GPa para uma rocha com porosidade próxima de zero.



**Figura 13** - Relação entre porosidade e módulo de cisalhamento para rochas secas da Fm Jandaíra sob pressão confinante efetiva de 40 MPa.

A Figura 14 apresenta o comportamento da razão de Poisson em função da porosidade. Neste caso observa-se que há um suave decréscimo de  $\nu$  com a porosidade e que, embora haja uma considerável dispersão ( $R^2 = 0,6$ ), todas as amostras apresentam valores de  $\nu$  de acordo com a função de regressão, a qual indica  $\nu \approx 0,31$  em amostras de porosidade muito baixa e  $\nu \approx 0,23$  em amostras com porosidade em torno de 20%.



**Figura 14** - Relação entre porosidade e razão de Poisson para rochas secas da Fm Jandaíra sob pressão confinante efetiva de 40 MPa.

Por fim a Tabela 1 sumariza as propriedades petrofísicas das rochas carbonáticas da Fm Jandaíra apresentadas neste trabalho. O objetivo desta tabela é permitir que outros grupos de pesquisa possam usar essa informação para investigações adicionais, tais como modelar suas propriedades sob diferentes condições ambientais ou de saturação fluida.

**Tabela 1** – Propriedades petrofísicas de rochas carbonáticas secas da FM Jandaíra medidas sob 40 MPa de pressão confinante efetiva.

Amostra	Porosidade (%)	Densidade de grãos (g/cm <sup>3</sup> )	VP (m/s)	VS <sub>1</sub> (m/s)	VS <sub>2</sub> (m/s)
AR_OBL_Hi	10.6	2.693	5242	2904	2915
AR_OBL_Hii	13.9	2.686	4753	2682	2667
AR_OBL_Vi	10.3	2.699	5324	2913	2954
AR_OBL_Vii	13.6	2.689	4878	2674	2686
AR_OBL_Viii	14	2.682	4842	2695	2705
CAL_RONC_H	21.5	2.753	3649	2197	2198
CAL_RONC_V	20.8	2.743	3672	2202	2194
CR_H	5.3	2.822	6119	3451	3465
CR_Vi	10.4	2.816	5657	3188	3210
CR_Viii	3.2	2.806	6551	3583	3606
LAJ_SOL_H	11.2	2.768	5102	2929	2930
LAJ_SOL_V	10.4	2.773	5186	2987	2994
LAJ_SOL_Vii	10.2	2.776	5329	3047	3049
ROSARIO_H	9.5	2.691	5713	3082	3054
ROSARIO_V	9.8	2.692	5355	2902	2910
CARB_CAL_Hi	3.7	2.662	5404	2965	2977
CARB_CAL_Hii	4.2	2.670	5580	3005	3050
CARB_CAL_Vi	3.6	2.670	5574	3012	3003
CR_Vii_2	16.1	2.713	3507	2114	2107
HPC_Hi	6.8	2.680	5463	2925	2922
HPC_Hii	8.3	2.659	5305	2898	2901
HPC_Vi	7.1	2.675	5370	2906	2947
HPC_Vii	7.9	2.673	5294	2903	2925

### Conclusões

Os valores de densidade de grãos medidos indicam que as amostras provenientes da parte norte da região estudada possuem matriz majoritariamente calcária, enquanto que na porção sul predomina matriz dolomítica. Adicionalmente, o processo de alteração sofrido pelo caliche e *hardpan* resultou em propriedades inferiores às das rochas sãs.

A densidade total das rochas da Fm Jandaíra apresentam um elevado grau de correlação inversa com a porosidade, sendo que há duas linhas de tendência, uma para rochas de matriz calcária e outra para rochas de matriz dolomítica.

As velocidades de propagação das ondas elásticas indicam um reduzido nível de anisotropia, limitado a 2%, para todas as amostras analisadas. De modo geral as propriedades elastodinâmicas das rochas da Fm Jandaíra apresentam fortes correlações inversas com a porosidade. Estas correlações apresentam elevados coeficientes de determinação e são válidas tanto para amostras de matriz carbonática quanto para aquelas cuja matriz é predominantemente dolomítica. No caso da razão de Poisson a correlação é suave e apresenta uma dispersão considerável.

### Agradecimentos

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

### Referências

- MATOS, R.M.D. (1992). Deep seismic profiling, basin geometry and tectonic evolution of intracontinental rift basins in Brazil. Ph.D. Dissertation, Cornell University, U.S.A.
- SHERIFF, R.E. (1991). Encyclopedic dictionary of exploration geophysics. Third edition. Society of Exploration Geophysics.
- SOARES, J.A. (1992). Um estudo da estabilidade mecânica de poços a partir de perfis geofísicos em formações pouco consolidadas. Dissertação de mestrado. Departamento de Geofísica da Universidade Federal do Pará.
- SOUSA J.F.; VIDAL, F.W.H. (2005). Rochas Carbonáticas. CETEM. Rio de Janeiro.
- SUGUIO, K. (2003). Geologia sedimentar. Editora Edgard Blücher Ltda. São Paulo.