

8º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

EFEITO DAS BANDAS DE DEFORMAÇÃO NA PETROFÍSICA DE ROCHAS SILICICLÁSTICAS DA BACIA RIO DO PEIXE

AUTORES:

VASCONCELOS, A. G. P.¹, SOUZA, F. M.², TABOSA, L. D. G.², NOGUEIRA, F. C. C.¹, SOARES, J. A.²

INSTITUIÇÃO:

Bolsista PRH-42 ANP, adnapazvasconcelos@gmail.com, ¹Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, ²Unidade 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- 8º PDPETRO, realizado pela a Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 20 a 22 de outubro de 2015, em Curitiba-PR. 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 8ºPDPETRO.

EFEITO DAS BANDAS DE DEFORMAÇÃO NA PETROFÍSICA DE ROCHAS SILICICLÁSTICAS DA BACIA DO RIO DO PEIXE

Abstract

The Rio do Peixe Basin has been studied by many authors in order to determine its origin, structural evolution and stratigraphy. However, those studies not discuss about the brittle structures in sedimentary deposits and their influence on petrophysical properties of sedimentary rocks. These deposits can be analyzed by the investigation of petrophysical properties in rock samples affected for brittle structures and the type of deformation bands. The main objective of this work is to identify the influence of deformation bands on the petrophysical properties of deformed sandstones and conglomerates. Therefore, petrographics analysis, experiments of permeability, porosity, density and velocity of propagation of P waves were performed in 57 samples. Petrophysics analysis performed on the samples with and without deformation bands showed a strong structural control. Furthermore, transpressive tectonics causes a strong reduction of around 67% in the average values of porosity, and reduction of about 97% in mean permeability, while the extensional tectonics results in about 23% increasing in mean values of porosity and 99% in average values of permeability.

Introdução

A precisa descrição das características geodinâmicas, petrográficas e petrofísicas de estruturas rúpteis em reservatórios é de fundamental importância quando se deseja avaliar, por exemplo, o fluxo de fluidos e as propriedades de armazenamento da rocha. No entanto, o complexo padrão de falhas e fraturas, torna a caracterização destes sistemas muito onerosa em termos de uma análise convencional. Dentro desse contexto, a Bacia Rio do Peixe (BRP) se constitui em um excelente laboratório para o entendimento da relação entre as estruturas controladoras da arquitetura interna de uma bacia sedimentar, além de ser considerada como uma nova fronteira exploratória de hidrocarboneto em território brasileiro, tendo em vista o volume de rochas sedimentares siliciclásticas depositadas durante sua formação, e principalmente por apresentar óleo maduro associado a estes depósitos.

A BRP apresenta grande variedade de estruturas tectônicas associadas a eventos distensivos relacionados a abertura da bacia (FRANÇOLIN et al., 1994), e eventos transpressivos responsáveis pela reativação da bacia (NOGUEIRA et al., 2015). Estas estruturas potencialmente exercem influência sobre as propriedades petrofísicas das rochas, refletindo nas características de fluxo de fluidos associados aos depósitos siliciclásticos desta bacia.

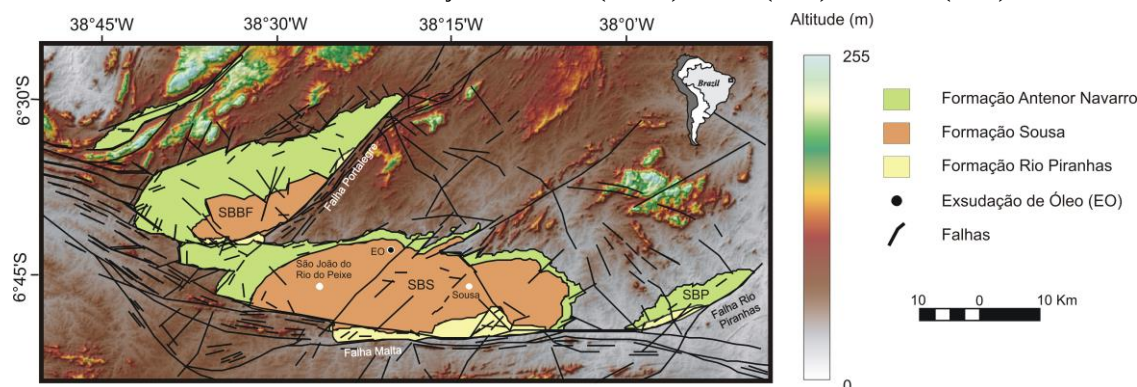
O objetivo geral deste trabalho é analisar a influência de bandas de deformação sobre o padrão de migração e acúmulo de fluidos da bacia e como essas estruturas afetam as propriedades físicas dos arenitos e conglomerados que compõem as formações Antenor Navarro e Rio Piranhas, bem como analisar a velocidade de propagação de ondas P e densidade total, visando entender a influência destas estruturas na migração de hidrocarboneto em rochas com potencial de reservatório.

Aspectos geológicos

A BRP está situada no extremo oeste do Estado da Paraíba, compreendendo três sub-bacias: Brejo das Freiras, Sousa e Pombal, as quais são separadas pelos altos internos do embasamento cristalino e controladas pela zona de cisalhamento Portalegre (NE-SW), e as falhas Malta (E-W) e Rio Piranhas (NE-SW) (FRANÇOLIN et al., 1994) (Figura 1). Estas estruturas presentes no embasamento

permitiram a geração e o desenvolvimento de uma variedade de estruturas tectônicas associadas a eventos distensivos, de abertura, e compressivos, de reativação (NOGUEIRA et al., 2015), permitindo a formação de bandas de deformação.

Figura 1 – Mapa geológico compilado a partir de outros trabalhos realizados na bacia, juntamente com dados SRTM das sub-bacias de Brejo das Freiras (SBBF), Sousa (SBS) e Pombal (SBP).



Os depósitos sedimentares desta bacia são representados pelas formações Antenor Navarro, Sousa e Rio Piranhas. A Formação Antenor Navarro repousa em não conformidade sobre o embasamento cristalino e é composta de arenitos de granulometria variando de fina a grossa, aflorando nas margens flexurais das sub-bacias, por vezes apresentando silicificação. A Formação Sousa, composta predominantemente por folhelhos fluvio-lacustrinos, aflora nas partes centrais das sub-bacias de Brejo das Freiras e Sousa. A Formação Rio Piranhas, composta por arenitos de granulometria grossa e conglomerados de borda, aflora apenas nas bordas falhadas da BRP (SILVA, 2009).

Metodologia

Na etapa inicial de trabalho, foi realizado o levantamento geológico da área de estudo e durante a análise estrutural em afloramentos, foi verificada a relação temporal das bandas de deformação presente nos arenitos e conglomerados; além disso, foram coletadas amostras, deformadas e não deformadas, de rochas das formações Antenor Navarro e Rio Piranhas.

Em laboratório, foi realizada a descrição faciológica das amostras. O preparo dos plugues e a medição da porosidade e permeabilidade foram realizados no Laboratório de Petrofísica da UFCG. O preparo das lâminas foi realizado na UFRN e a interpretação feita em uma versão de teste do *software* Imago.

Para dimensionar as propriedades petrofísicas de rochas siliciclásticas da BRP utilizou-se o equipamento UltraPoroPerm 500®, por meio 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 foram extraídos atributos que permitiram calcular a densidade de grãos. Com a porosidade e a densidade de grãos pode-se estimar a densidade total da rocha, e para a medição das velocidades elásticas de onda P foi utilizado o sistema AutoLab 500®.

Resultados e Discussão

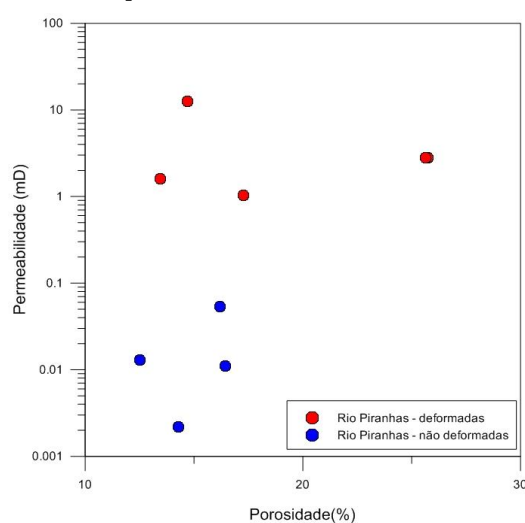
A análise de paleotensões permitiu identificar a atuação de pelo menos dois tensores de compressão máxima, sendo o primeiro vertical e o segundo horizontal. De acordo com NOGUEIRA et al. (2015), o tensor de compressão máxima vertical permitiu a geração de uma extensão máxima segundo a direção

NW-SE, gerando falhas normais e transtensionais responsáveis pela formação da bacia. O tensor de compressão máxima horizontal está orientado segundo a direção E-W, sendo responsável pela formação e evolução de estruturas nas direções NE-SW, E-W, NW-SE e N-S, associado ao regime tectônico transpressivo (FRANÇOLIN, 1994).

A análise petrofísica realizada em amostras de rochas, deformadas e não deformadas, compostas por arenitos e conglomerados das formações Antenor Navarro e Rio Piranhas, demonstrou um forte controle estrutural. Tal fato foi percebido pela modificação nos valores das propriedades petrofísicas em rochas afetadas por bandas de deformação.

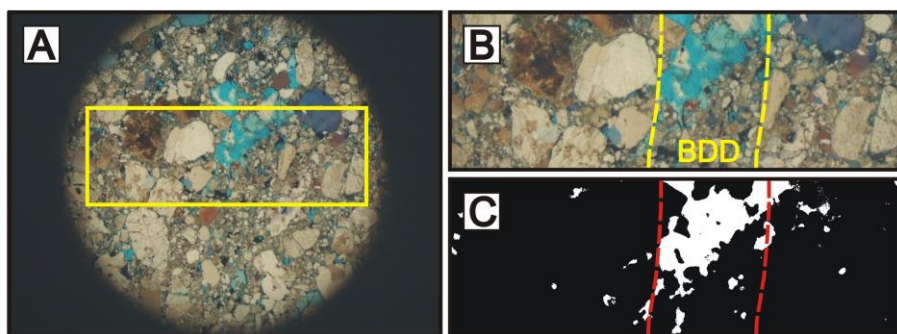
Para amostras deformadas de arenitos e conglomerados da Formação Rio Piranhas, associadas a uma tectônica distensiva, os valores médios observados de porosidade foram de 19% e de permeabilidade de 4 mD (Figura 2). Esta mesma unidade quando não deformada por estruturas tectônicas apresenta porosidade média de 14% e permeabilidade média de 0,02 mD (Figura 2).

Figura 2 - Porosidade versus permeabilidade das amostras da Formação Rio Piranhas.



O principal tipo de banda de deformação identificado nas rochas da Formação Rio Piranhas é do tipo dilatante, que tem o volume de poros aumentado na zona de dano e é característico de regimes distensivos (FOSSEN, 2007) (Figura 3A). Na zona de dano, delimitada pelo tracejado amarelo (Figura 3B), pode-se notar um aumento do volume de poros em relação às zonas adjacentes, indicado pela coloração azul na fotografia de lâmina, e pela cor branca na imagem binarizada (Figura 3C).

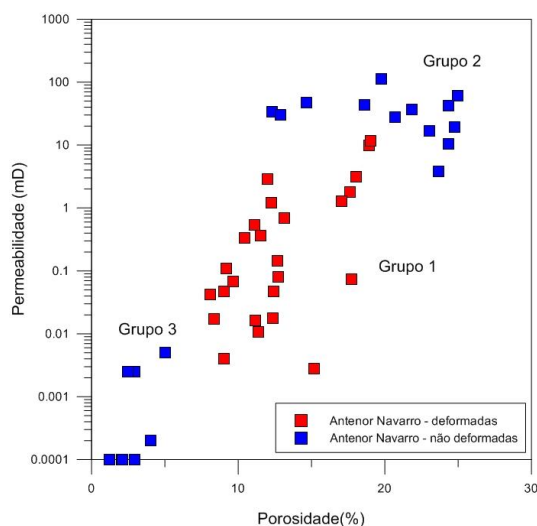
Figura 3 – (A) Fotografia de lâmina; (B) Banda de deformação do tipo dilatação com núcleo delimitado pelo tracejado amarelo; (C) Imagem de detalhe binarizada da banda, com núcleo delimitado pelo tracejado vermelho.



Nas bandas de deformação associadas à Formação Antenor Navarro a porosidade reduz com relação aos valores de porosidade das rochas encaixantes, que apresentam pouca ou nenhuma deformação. A porosidade média calculada para amostras de arenitos e conglomerados da Formação Antenor Navarro,

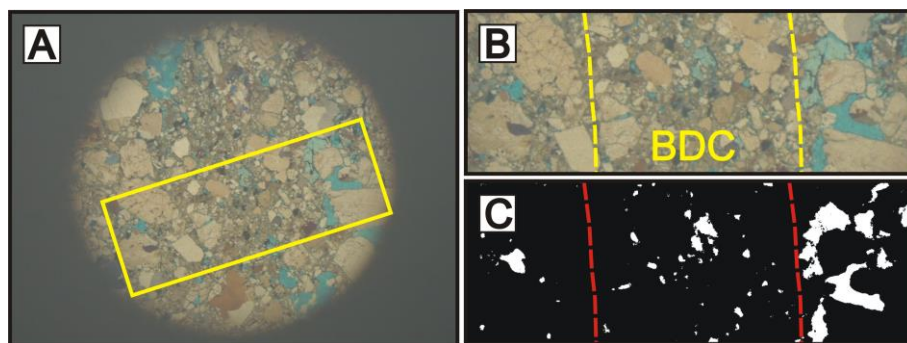
deformadas por eventos tectônicos de cinemática transpressiva, foi de 11% e a permeabilidade média foi de 0,56 mD (Grupo 1 na Figura 4). Estas mesmas unidades, porém, não deformadas, apresentam valores médios de porosidade de 20% e de permeabilidade de 37 mD (Grupo 2 na Figura 4). A redução nos valores de porosidade e permeabilidade das amostras de rocha da Formação Antenor Navarro também é percebida quando da presença de matriz argilosa preenchendo os poros da rocha, conforme observado em lâmina, assim como a intensa silicificação, afetando os arenitos e promovendo forte redução nas características permoporosas (Grupo 3 na Figura 4). Estas unidades apresentam valores médios de porosidade de 3% e de permeabilidade de 0,001 mD.

Figura 4 – Porosidade *versus* permeabilidade das amostras da Formação Antenor Navarro.



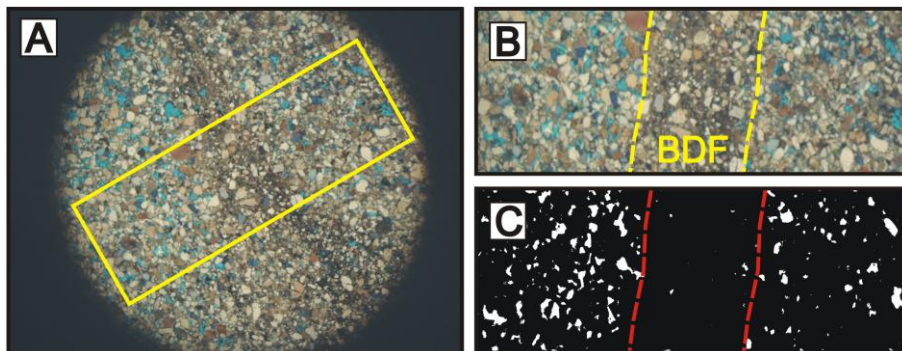
Pode-se observar em imagens de lâmina as bandas de deformação do tipo cataclástica, associadas à cinemática transpressiva, em amostras de rochas pertencentes à Formação Antenor Navarro. A Figura 5A é um exemplo do efeito do processo cataclástico promovendo a diminuição do tamanho dos grãos na zona de falha, mudando, com isso, a seletividade e esfericidade dos grãos, o que afeta as propriedades permoporosas da rocha. Tanto na imagem da lâmina quanto na imagem binarizada, observamos uma maior quantidade de poros de tamanho maiores em zonas exteriores ao núcleo da deformação (Figura 5B e 5C).

Figura 5 – (A) Fotografia de lâmina; (B) Banda de deformação cataclástica com núcleo delimitado pelo tracejado amarelo; (C) Imagem de detalhe binarizada da banda, com núcleo delimitado pelo tracejado vermelho.



Além da cominuição dos grãos, ou simplesmente cataclase, a banda de deformação filossilicática também encontrada em afloramento, apresenta material argiloso em seus espaços porosos, identificado na fotografia da lâmina como o material de cor escura preenchendo os espaços porosos (Figura 6A). Este material é responsável pela redução drástica das características permoporosas de amostras representativas de um mesmo regime tectônico. Na Figura 6B e 6C, observamos o núcleo da banda de deformação cataclástica na imagem de detalhe e na imagem binarizada, respectivamente, onde pode-se notar o fechamento dos espaços porosos.

Figura 6 – (A) Fotografia de lâmina; (B) Banda de deformação filossilicática com núcleo delimitado pelo tracejado amarelo; (C) Imagem de detalhe binarizada da banda, com núcleo delimitado pelo tracejado vermelho.



Foram encontradas velocidades (V_p) da ordem de 3000 m/s, para a Formação Rio Piranhas, e velocidades mais elevadas para as rochas da Formação Antenor Navarro, sobretudo as de maior densidade: V_p acima de 5000 m/s. A Figura 7A apresenta as relações entre V_p e porosidade para amostras da Formação Rio Piranhas sob 40 MPa de pressão efetiva. Para uma dada velocidade, pode-se observar maiores valores de porosidade nas amostras deformadas.

A Figura 7B apresenta as relações entre V_p e porosidade de amostras da Formação Antenor Navarro para 40 MPa de pressão efetiva. Há um grupo de amostras com velocidades relativamente altas, variando entre 5000 e 6000 m/s, devido à baixa porosidade e à presença de argila preenchendo os poros da rocha.

Figura 7A – Relação entre velocidade da onda P e porosidade para pressão efetiva igual a 40 MPa das amostras da Formação Rio Piranhas.

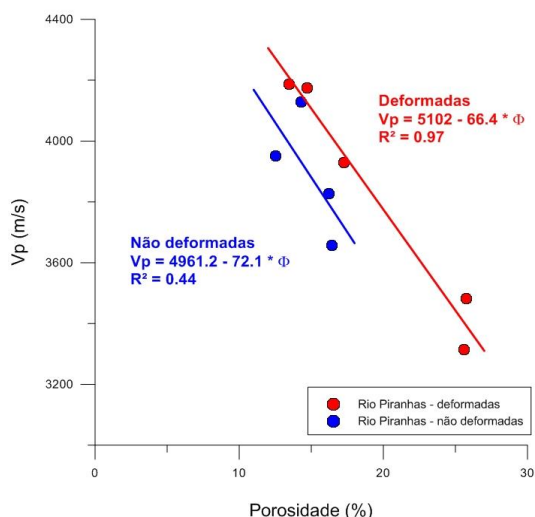
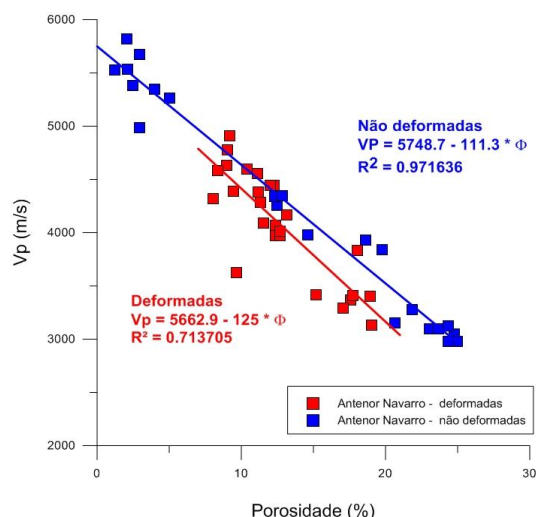
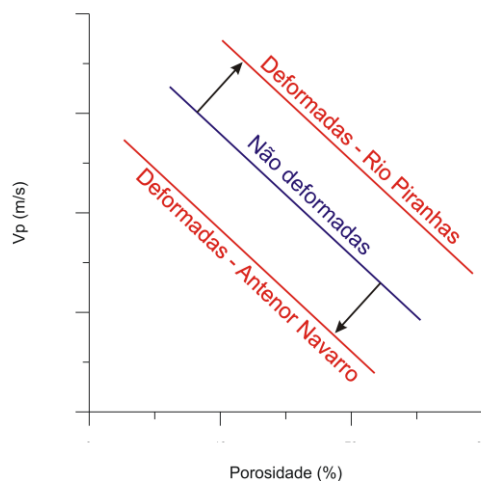


Figura 7B – Relação entre velocidade da onda P e porosidade para pressão efetiva igual a 40 MPa das amostras da Formação Antenor Navarro.



Na Figura 9 pode-se observar a modificação causada nas velocidades de ondas P pela deformação, para as duas formações, onde para uma dada velocidade esperada, temos valores médios de porosidade maiores para a Formação Rio Piranhas. O contrário pode ser observado nas amostras da Formação Antenor Navarro, que tem a porosidade reduzida pela deformação, para uma dada velocidade de propagação de onda.

Figura 9 – Relação geral entre velocidade de onda P e porosidade para amostras deformadas e não deformadas das formações Rio Piranhas e Antenor Navarro.



Os valores de densidade total das amostras da Formação Rio Piranhas estão apresentados na Figura 8A. A Figura 8B apresenta, para amostras da Formação Antenor Navarro, maiores valores de densidade total quando comparados às amostras da Formação Rio Piranhas. As amostras de densidade variando entre 2,4 e 2,6 g/cm³ são pouco porosas e apresentam alto grau de compactação, causada pela silicificação resultante de eventos de reativação da bacia e/ou pela presença de argilominerais no interior dos poros. Para o caso das amostras da Formação Antenor Navarro se observa uma maior dispersão na relação linear entre densidade total e porosidade, o que é indicativo de uma maior variação composicional das rochas desta formação.

Figura 8A – Densidade total medida versus porosidade da Formação Rio Piranhas.

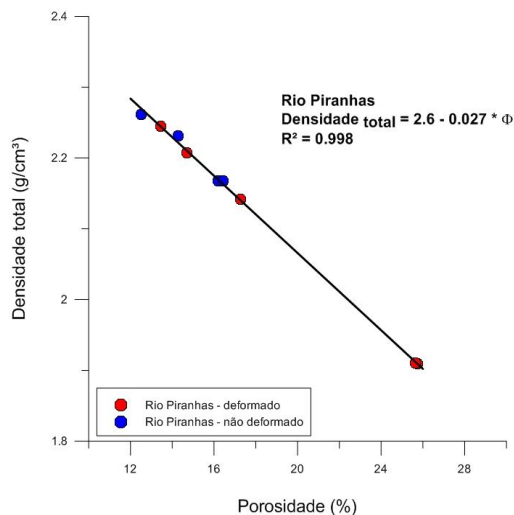
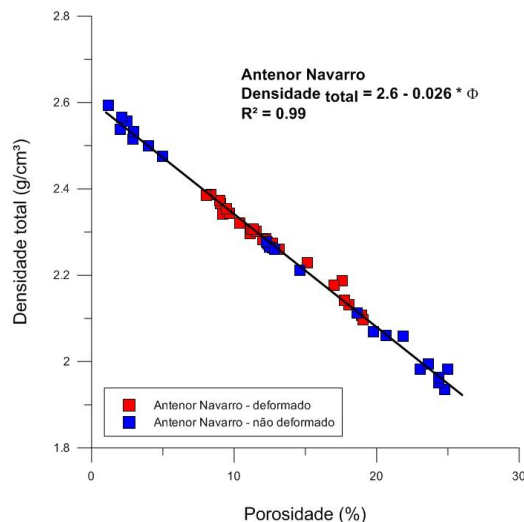


Figura 8B – Densidade total medida versus porosidade da Formação Antenor Navarro.



Conclusões

Com base nas atividades de pesquisa desenvolvidas foi possível observar três tipos predominantes de bandas de deformação. Bandas do tipo dilatante, na maioria das vezes associada ao regime distensivo, onde percebemos um aumento do volume poroso no núcleo da deformação. Este tipo de banda de deformação, presente na Formação Rio Piranhas, pode agir como rota preferencial ao fluxo de fluidos. Banda cataclástica, que, devido sua deformação ser associada à cinemática transpressiva, tem o tamanho de grão significativamente reduzido, fechando os espaços vazios da rocha em toda sua zona de dano e no núcleo da deformação, acarretando reduções nas propriedades permoporosas. Este tipo é

encontrado em amostras da Formação Antenor Navarro. E a banda do tipo filossilicática, que contém níveis argilosos preenchendo o núcleo da banda e, com isso, pode causar redução nas propriedades permoporosas, podendo funcionar como barreira ao fluxo.

As amostras deformadas da Formação Rio Piranhas apresentam valores médios de porosidade cerca de 23% maiores do que as não deformadas, enquanto que os valores de permeabilidade são cerca de 99% maiores. Nas amostras da Formação Antenor Navarro, a deformação causou uma redução de cerca de 67% na porosidade e de 97% na permeabilidade. Essa redução nos valores das propriedades petrofísicas é atribuída a processos de cataclase e presença de argila, além da silicificação em algumas amostras de arenito.

As velocidades de propagação de ondas P são relativamente elevadas para a maioria das amostras analisadas, refletindo porosidades baixas, presença de argila preenchendo os espaços porosos e silicificação associada à reativação da bacia. O efeito da deformação observado sobre as propriedades elásticas (ondas P) é reduzido quando comparado ao efeito nas propriedades permoporosas.

As amostras apresentam uma relação linear quase perfeita entre a densidade total e a porosidade, indicando uma composição mineral aproximadamente idêntica. As amostras da Formação Antenor Navarro apresentam maiores valores de densidade total quando comparados às amostras da Formação Rio Piranhas, devido ao alto grau de compactação, causada pela cataclase resultante dos esforços compressivos e pela presença de argilominerais nos espaços porosos. Para o caso das amostras da Formação Antenor Navarro a maior dispersão na relação linear entre densidade total e porosidade indica uma maior variação composicional em relação às amostras da Formação Rio Piranhas.

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. Ao CNPq pelo financiamento do Projeto Nº 73212/2012-2. Além destes os autores agradecem ao PRH 42 pela concessão da bolsa, à FINEP, ao CTPETRO e à ANP.

Referências Bibliográficas

FOSSEN, H., SCHULTZ, R. A., SHIPTON, Z. K., MAIR, K. *Deformation bands in sandstone: a review*. Journal of the Geological Society, London, v. 164, p. 755–769, 2007.

FRANÇOLIN, J. B. L.; COBBOLD, P. R.; SZATMARI, P. *Faulting in the Early Cretaceous Rio do Peixe basin (NE Brazil) and its significance for the opening of the Atlantic*. Journal of Structural Geology, 16, 647–661, 1994.

NOGUEIRA, F. C. C., MARQUES, F. O., BEZERRA, F. H. R., DE CASTRO, D. L., FUCK, R. A. *Cretaceous intracontinental rifting and post-rift inversion in NE Brazil: Insights from the Rio do Peixe Basin*. Tectonophysics, 2015.

SILVA, A. N. *Arquitetura, litofácies e evolução tectono-estratigráfica da Bacia Rio do Peixe, Nordeste do Brasil*. Dissertação de mestrado. Natal – RN, UFRN, 2009.

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