

Propriedades petrofísicas de arenitos afetados por Bandas de Deformação

A.G.P. VASCONCELOS* (DEM/ UFCG)¹, F.M. SOUZA (DMG/ UFCG)², L.D.G. TABOSA (DMG/ UFCG)², F. C. C. NOGUEIRA (DEM/ UFCG)¹, J. A. SOARES (DMG/ UFCG)²

¹ Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Campina Grande

² Departamento de Mineração e Geologia – Universidade Federal de Campina Grande

This paper was prepared for presentation during the 14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 3-6, 2015.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 14th 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.

Abstract

The Rio do Peixe Basin has been studied in order to determine its origin, structural evolution and stratigraphy. However, those studies not discuss about the brittle structures in sedimentary deposits and the influence on petrophysical properties of sedimentary rocks. These deposits can be analyzed by the investigation of petrophysical properties in rock samples affected by 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, petrophysical analysis, petrographic, density and velocity of propagation of P waves in 57 samples were performed. The petrophysics analysis performed on the samples with and without Deformation Bands showed a strong structural control. These structures are associated with maximum compressive stress that acted upon the study area shifted from vertical to horizontal and was oriented approximately ENE-WSW and E-W, respectively. In petrophysical analysis samples of deformed rocks by transpressive tectonic have greater reduction in porosity and permeability values. Overall, transpressive tectonic printed in the rock a strong reduction of around 67% in the average values of porosity, and reduction of about 97% in mean permeability, while the extensional tectonics caused an increase of about 23% in mean values of porosity and 99% 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 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 sedimentos

siliciclásticos depositados durante sua formação, e principalmente por apresentar óleo maturo associado aos folhelhos da Formação Sousa.

O objetivo geral é analisar a influência de Bandas de Deformação sobre o padrão de migração e acumulação de fluidos da bacia e como essas estruturas afetam as propriedades físicas de duas de suas unidades, bem como analisar propriedades elásticas (velocidade de propagação de ondas P) e densidade total, visando entender a influência destas estruturas na eficácia da produção de hidrocarboneto em rochas com potencial de reservatório.

Aspectos Geológicos

A Bacia Rio do Peixe (BRP) está situada no extremo oeste do Estado da Paraíba, compreendendo três sub-bacias. As sub-bacias de Brejo das Freiras, Sousa e Pombal 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) (Figura 1).

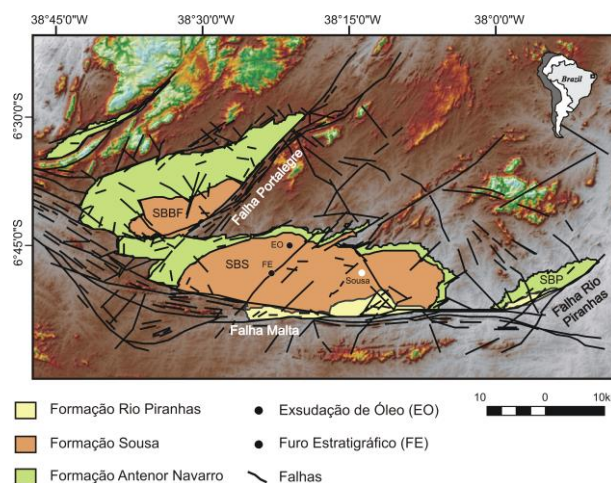


Figura 1 – Mapa geológico compilado a partir de outros trabalhos realizados na bacia, juntamente com dados SRTM das adjacências da BRP.

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. A Formação Sousa, composta predominantemente por folhelhos fluvio-lacustrinos, aflorando nas partes centrais das sub-bacias de Brejo das Freiras e Sousa. E a Formação Rio Piranhas, composta de arenitos de granulometria grossa e

conglomerados de borda, aflorando apenas nas bordas falhadas da BRP.

A BRP apresenta uma variedade de estruturas tectônicas associadas a eventos distensivos e compressivos, de abertura da bacia e reativação das estruturas do embasamento (NOGUEIRA et al., 2015), permitindo a formação de Bandas de Deformação. Estas estruturas devem exercer forte influência sobre as propriedades físicas das rochas, refletindo nas características de fluxo de fluidos associados aos depósitos siliciclásticos desta bacia.

Métodos

Na etapa inicial de trabalho foi realizado o levantamento geológico na área de estudo com objetivo de realizar análise estrutural em afloramentos e coletar plugues afetados por estruturas rúpteis do tipo Bandas de Deformação. As amostras coletadas variam de arenitos finos bem selecionados até conglomerados de composição química variada.

Durante as atividades de campo foram coletadas amostras em afloramento, deformadas e não deformadas, de rochas das formações Antenor Navarro e Rio Piranhas, para medição das propriedades petrofísicas. O preparo dos plugues e a medição da porosidade e permeabilidade foram realizados no Laboratório de Petrofísica da UFCG.

Plugues cilíndricos com 1,5 polegadas de diâmetro e cerca de 5 centímetros de comprimento foram preparados. Após a sua preparação, os plugues foram submetidos à secagem em estufa por 24 horas sob temperatura constante de 80°C, pesados em balança eletrônica de precisão e foram realizadas as medições de suas dimensões (diâmetro e comprimento) com paquímetro digital.

Para as medições das permeabilidades e porosidades das rochas siliciclásticas da BRP utilizou-se o equipamento UltraPoroPerm 500®, fabricado pela Corelab.

Por meio do método da porosimetria por expansão gasosa (TIAB; DONALDSON, 2004), e com o auxílio de um *matrix cup*, medimos o volume de grãos da amostra. Como o peso da amostra corresponde ao peso desta fase sólida, determinamos a densidade de grãos. A partir do volume medido da amostra, subtraímos o volume de grãos e obtemos o volume de vazios na amostra e, por conseguinte, a porosidade.

A permeabilidade foi obtida com o auxílio de um *coreholder*, onde as amostras foram submetidas à uma pressão confinante de 1000 psi e a um fluxo não-turbulento de nitrogênio com 58 psi de entrada. A diferença entre as pressões de entrada e saída do fluxo são relacionadas à permeabilidade pela Lei de Darcy, de onde obtemos seus valores.

Para a medição das velocidades elásticas foi utilizado o sistema AutoLab 500®, 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: S₁ e S₂. Entretanto foi analisado somente o resultado da onda P.

Resultados

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).

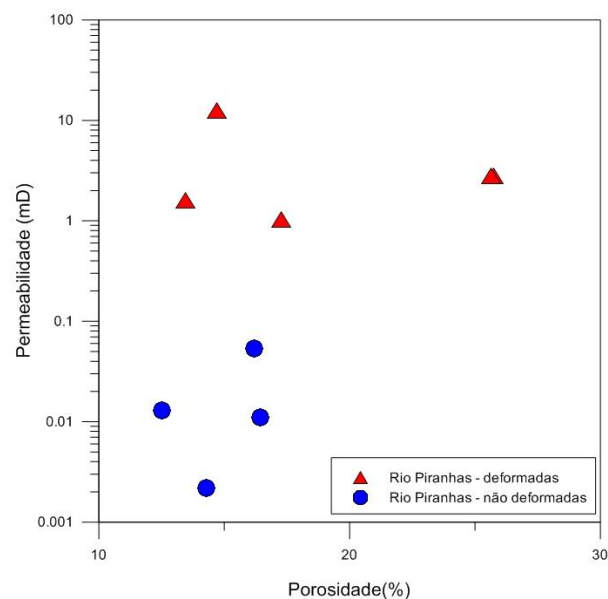


Figura 2 - Porosidade versus permeabilidade das amostras da Formação Rio Piranhas.

O principal tipo de Banda de Deformação identificado nas rochas da Formação Rio Piranhas é do tipo dilatante, e são características de regimes distensivos. Na zona de dano, delimitada pelo tracejado amarelo (Figura 3B), pode-se notar um aumento do volume poroso em relação às zonas adjacentes, indicado pela coloração azul na imagem de lâmina, e pela cor branca na imagem binarizada (Figura 3C).

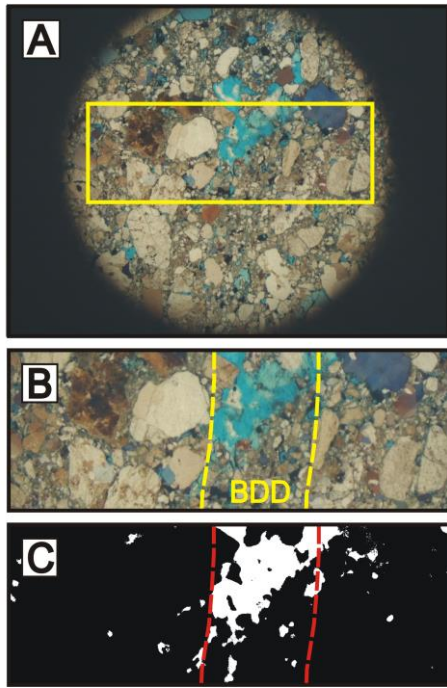


Figura 3 – (A) Fotografia de lâmina; (B) Banda de Deformação do tipo dilatação com núcleo delimitado pelo tracejado amarelo; (C) Imagem de detalhe binarizada da banda, com núcleo delimitado pelo tracejado vermelho.

Quando as Bandas de Deformação estão associadas à Formação Antenor Navarro a porosidade reduz com relação aos valores de porosidade pertencentes às rochas encaixantes. 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 2 na Figura 4). Estas mesmas unidades, porém não deformadas, apresentam valores médios de porosidade de 20% e de permeabilidade de 37 mD (Grupo 1 na Figura 4). A redução nos valores de porosidade e permeabilidade das amostras de rocha da Formação Antenor Navarro também sofre influência da presença de matriz argilosa ao longo do plano de falha preenchendo os poros da rocha, conforme observado em afloramento, assim como a intensa silicificação associada à deformação 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.

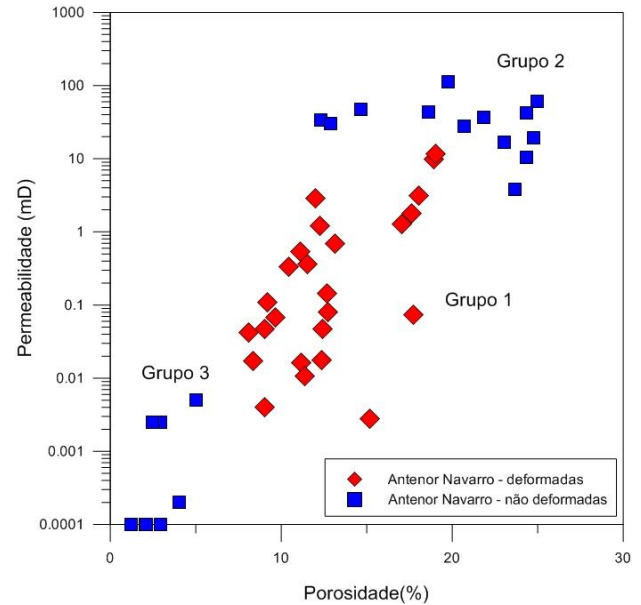


Figura 4 – Porosidade versus permeabilidade das amostras da Formação Antenor Navarro.

Pode-se observar em imagens de lâmina as Bandas de Deformação do tipo cataclástica, associadas à cinemática transpressiva, com preenchimento de minerais de argila, em amostras de rochas pertencentes à Formação Antenor Navarro. A Figura 5 é um exemplo do efeito do processo cataclástico promovendo a diminuição do tamanho dos grãos na zona de dano, 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).

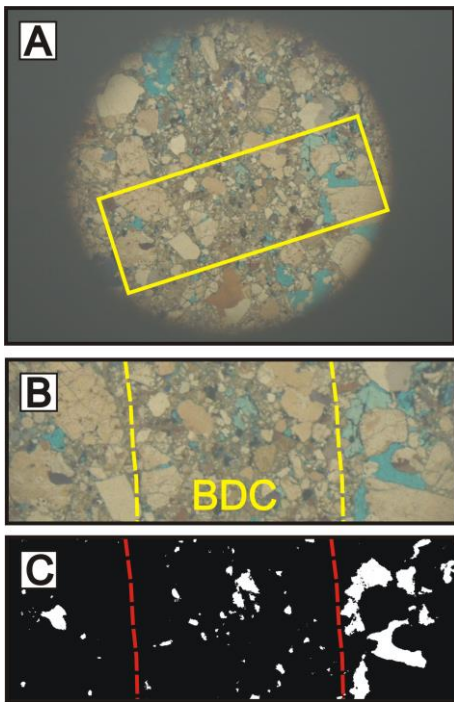


Figura 5 – (A) Fotografia de lâmina; (B) Banda de Deformação cataclástica com núcleo delimitado pelo tracejado amarelo; (C) Imagem de detalhe binarizada da banda, com núcleo delimitado pelo tracejado vermelho.

Foram encontradas velocidades relativamente baixas, VP da ordem de 3000 m/s, para a Formação Rio Piranhas, entretanto há também velocidades muito elevadas para rochas sedimentares da Formação Antenor Navarro, sobretudo as de maiores densidades: VP acima de 5000 m/s. A Figura 6 apresenta as relações entre VP e porosidade para amostras da Formação Rio Piranhas, para 40 MPa de pressão de confinamento. Foi calculado um baixo coeficiente de relação linear para as amostras não deformadas, devido ao fato de termos um intervalo de variação de porosidade pequeno e um número reduzido de amostras. Para uma dada velocidade, pode-se observar maiores valores de porosidade nas amostras deformadas.

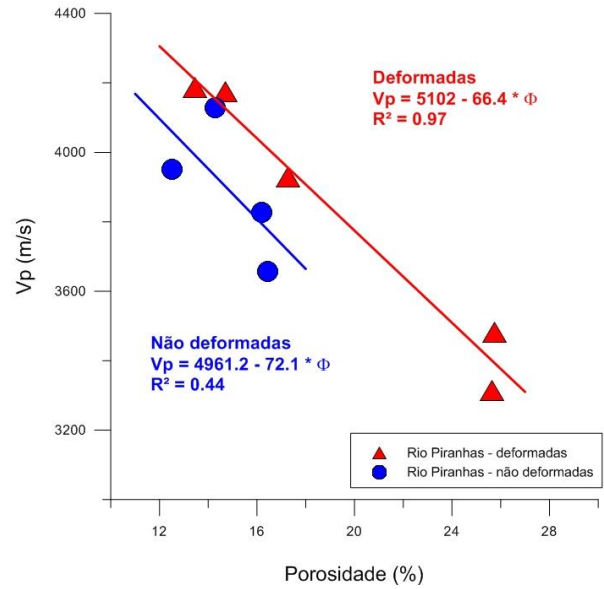


Figura 6 – Relação entre velocidade da onda P e porosidade para pressão confinante igual a 40 MPa das amostras da Formação Rio Piranhas.

A Figura 7 apresenta as relações entre VP e porosidade de amostras da Formação Antenor Navarro para 40 MPa de confinamento. 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 planos de falha, sempre associadas a eventos de cataclase, conforme pode ser visto em imagem de lâmina (Figura 5). No geral, as amostras apresentam uma boa relação linear, sobretudo as não deformadas, indicando uma composição mineral bastante homogênea.

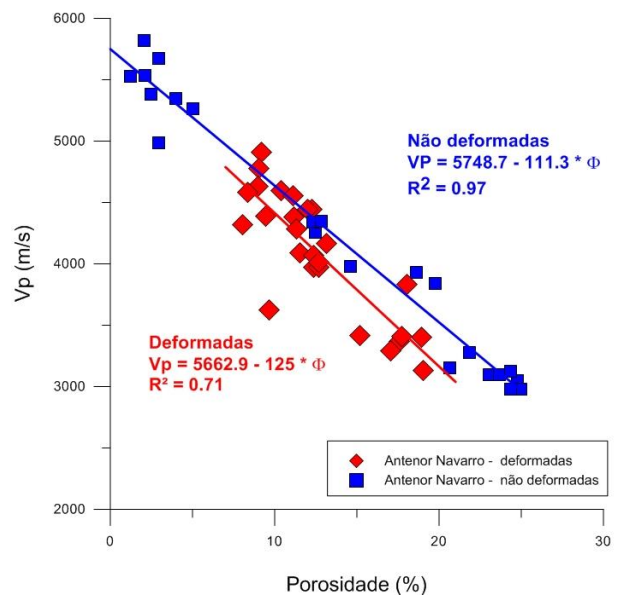


Figura 7 – Relação entre velocidade da onda P e porosidade para pressão confinante igual a 40 MPa das amostras da Formação Antenor Navarro.

De modo geral observa-se que os valores de porosidade são mais afetados pela deformação do que as

propriedades elásticas (velocidade de propagação da onda P).

A Figura 8 indica que as amostras são compostas, basicamente, por minerais quartzosos, com teores variados de feldspato ortoclásio (rico em potássio) e sem presença de minerais carbonáticos. As amostras com menor densidade de grão são as mais ricas em feldspato potássico, enquanto que as de maior densidade de grão são mais quartzosas.

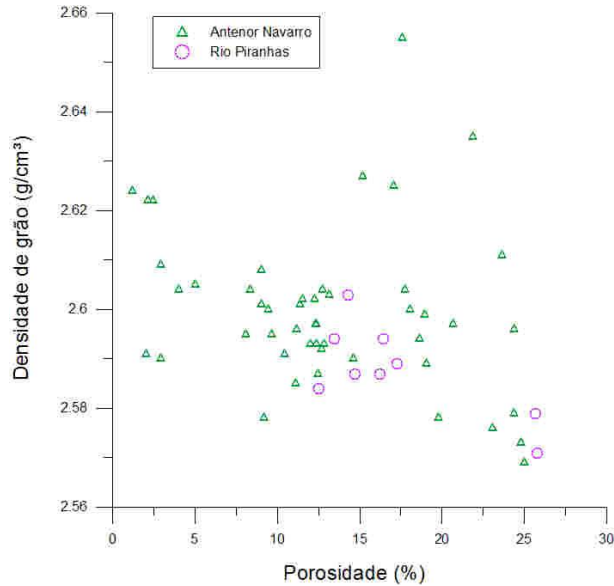


Figura 8 – Densidade de grão *versus* porosidade das amostras deformadas e não deformadas de arenitos porosos da BRP.

Os valores de densidade total das amostras da Formação Rio Piranhas estão apresentados na Figura 9. As amostras apresentam uma relação linear quase perfeita entre a densidade total e a porosidade. Isto indica que a composição mineral é aproximadamente idêntica para estas amostras.

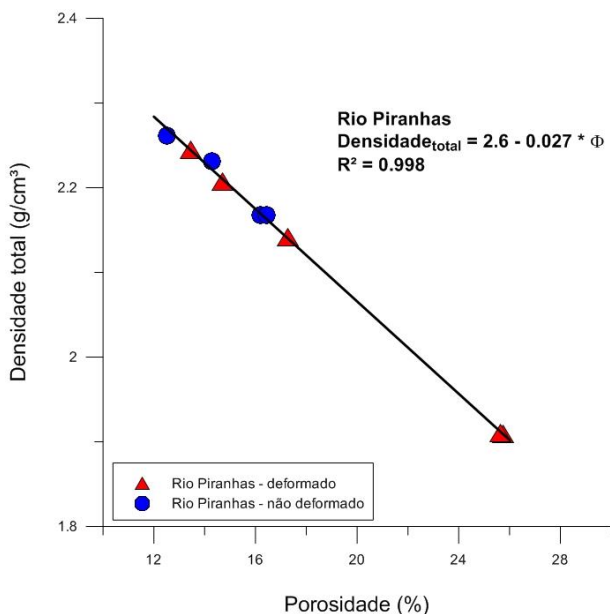


Figura 9 – Densidade total *versus* porosidade da Formação Rio Piranhas.

A Figura 10 apresenta, para amostras da Formação Antenor Navarro, maiores valores de densidade total quando comparados às amostras de 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 cataclase resultante dos esforços compressivos e pela deposição de argilominerais no interior da Banda de Deformação. Para o caso das amostras da Formação Antenor Navarro se observa uma maior dispersão na relação linear entre densidade total e porosidade, o que indica uma maior variação composicional em relação às amostras da Formação Rio Piranhas.

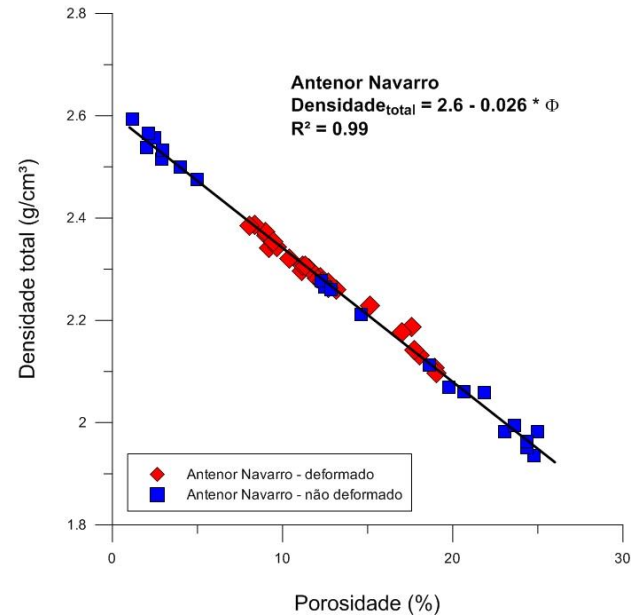


Figura 10 – Densidade total *versus* porosidade da Formação Antenor Navarro.

Na Figura 11 pode-se observar a modificação causada nas velocidades de ondas P 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 suas propriedades permoporosas reduzidas pela deformação.

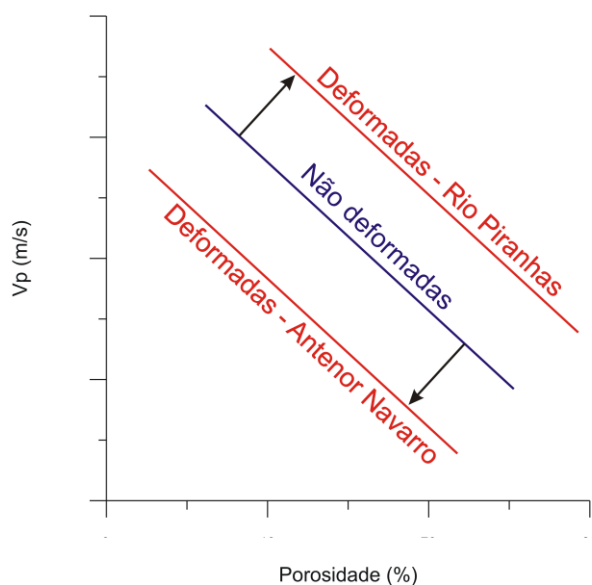


Figura 11 – Esquema da relação entre velocidade de onda P e porosidade para amostras deformadas e não deformadas das formações Rio Piranhas e Antenor Navarro.

Conclusões

Com base nas atividades de pesquisa desenvolvidas foi possível observar dois tipos de Bandas de Deformação. Bandas do tipo dilatação, 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. E, por fim, a 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, acarretando reduções nas propriedades permoporosas. Este tipo é encontrado em amostras da Formação Antenor Navarro.

As amostras deformadas da Formação Rio Piranhas apresentam valores médios de porosidade cerca de 23% maiores do que as não deformadas, enquanto que a diferença nos valores de permeabilidade é de cerca de 99%. Nas amostras da Formação Antenor Navarro, a deformação causou uma redução de cerca de 67% na porosidade e 97% na permeabilidade. Essa redução nos valores das propriedades petrofísicas é atribuída a processos de catáclase e presença de argila, além da silicificação em algumas amostras de arenito. As velocidades de propagação de ondas P, medidas em amostras secas, são relativamente elevadas para a maioria das amostras analisadas, refletindo porosidades baixas, presença de argila preenchendo os espaços porosos e silicificação associada à deformação. O efeito da deformação observado sobre as propriedades elásticas (ondas P) é reduzido quando comparado ao efeito nas propriedades permoporosas.

Todas as amostras são compostas, basicamente, por minerais quartzosos, com teores de feldspato ortoclásio (rico em potássio) e ausência de minerais carbonáticos.

As amostras apresentam uma forte relação linear entre a densidade total e a porosidade, indicando uma composição mineral semelhante. As amostras da Formação Antenor Navarro apresentam maiores valores de densidade total quando comparados às amostras de Rio Piranhas, devido ao alto grau de compactação, causada pela cataclase resultante dos esforços compressivos e pela deposição de argilominerais no interior da Banda de Deformação. 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, concedido ao Prof. José Agnelo Soares, pelo financiamento da pesquisa e à PETROBRAS pela permissão para a publicação destes resultados. Ao CNPq pelo financiamento do Projeto Nº 73212/2012-2 concedido ao Prof. Francisco C.C. Nogueira. Além destes os autores agradecem ao PRH 42 pela concessão da bolsa, à FINEP, ao CTPETRO e à ANP.

Referências

ANTONELLINI, M. A.; AYDIN, A. 1994. *Effect of faulting on fluid flow in porous sandstones: petrophysical properties*. American Association of Petroleum Geologists, Bulletin, **78**, 355–377.

CONCEIÇÃO, J.C.J.; ZALÁN, P.V.; WOLFF, S. 1988. *Mecanismo, Evolução e Cronologia do Rift Sul Atlântico*. Boletim de Geociências da PETROBRAS, **2**, 255–265.

FRANÇOLIN, J. B. L.; COBBOLD, P. R.; SZATMARI, P. 1994. *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.

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

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