

Efeito dos contatos de grãos sobre as velocidades elásticas de tufas calcárias.

Soares, J.A.¹; Costa, W.R.P.¹; Coura, R.L.C.¹; Vidal, A.D.¹

¹ Laboratório de Petrofísica, Universidade Federal de Campina Grande

Copyright 2014, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no VI Simpósio Brasileiro de Geofísica, Porto Alegre, 14 a 16 de outubro de 2014. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do VI 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

Este trabalho propõe um novo método para a análise da composição mineral e a quantificação do efeito da qualidade dos contatos de grão sobre a relação entre as velocidades elásticas e a porosidade de amostras secas de tufas carbonáticas. Este método é baseado em medidas laboratoriais de porosidade, de densidade de grãos, e de velocidades elásticas. Imagens microtomográficas de raios x são utilizadas na determinação da densidade das fases inicialmente desconhecidas. A aplicação do método em 18 amostras de tufas da Bacia Potiguar possibilitou quantificar a qualidade dos contatos através das suas velocidades elásticas. Por fim, aplicando uma correção nas velocidades medidas a fim de excluir o efeito dos contatos de grão, as dispersões nas relações entre as velocidades elásticas e a porosidade foram drasticamente reduzidas.

Introdução

Tufas carbonáticas são depósitos normalmente precipitados em águas calmas e sob temperatura ambiente caracterizados por baixas taxas de deposição. Formam corpos altamente porosos com um acamamento pobre e restos abundantes de matéria orgânica, como micro- e macrófitas, invertebrados e bactérias (FORD & PEDLEY, 1996; PEDLEY, 2009).

Na seção cretácica da Bacia Potiguar ocorre a Formação Jandaíra, uma plataforma carbonática formada durante a abertura do Atlântico sul no período campaniano-santoniano (REYES-PEREZ ET AL, 2003). Esta formação se constitui na maior plataforma cretácica da margem brasileira, apresentando exposições de até dois quilômetros de extensão.

Na Formação Jandaíra ocorrem depósitos de tufas carbonáticas formadas em diversos ambientes de sedimentação, como cavernas e barreiras ao fluxo de cursos de água, principalmente na forma de cachoeiras.

Neste trabalho são analisadas as propriedades petrofísicas de 18 amostras de tufa carbonática coletadas no afloramento conhecido como "Cachoeira Roncador", localizado no município de Felipe Guerra, no estado do Rio Grande do Norte. A Figura 1 apresenta um mapa de localização do citado afloramento.

O objetivo deste trabalho é estudar o efeito da qualidade dos contatos entre grãos sobre a dispersão observada na

relação entre as velocidades elásticas e a porosidade de amostras de tufa carbonática coletadas no afloramento Cachoeira Roncador.

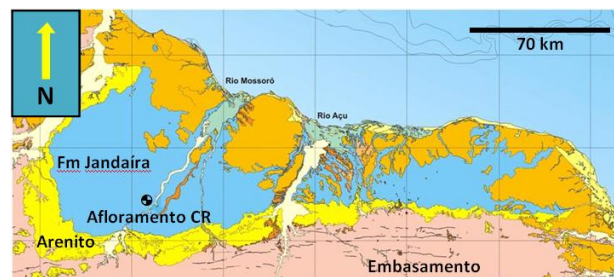


Figura 1 – Localização do afloramento Cachoeira Roncador (CR), do qual as amostras de tufa analisadas neste trabalho foram coletadas.

Para isto as amostras, após a devida preparação, foram submetidas a ensaios de porosidade e de densidade de grãos, por picnometria gasosa, e a ensaios de velocidade das ondas elásticas sob pressão confinante de 10 MPa. Todos os ensaios foram realizados com amostras secas e sob temperatura ambiente.

Extração e preparação de amostras

As amostras de rocha foram extraídas do afloramento através do uso de uma plugadeira portátil movida à gasolina. Tal procedimento forneceu plugues cilíndricos com uma polegada e meia de diâmetro, os quais receberam acabamento na sala de preparação de amostras do Laboratório de Petrofísica da UFCG. Os plugues acabados possuem cerca de 5 centímetros de comprimento.

Em seguida os plugues são colocados numa estufa para secagem 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 laboratoriais

A fase de análises laboratoriais tem início com a medição da porosidade e da densidade de grãos em permoporosímetro a gás (nitrogênio analítico 5.0). O plugue é colocado dentro do copo matriz onde é medido seu volume de grãos e, a partir deste, calculada sua porosidade e sua densidade de grãos (considerando que a massa do plugue é igual à massa dos grãos, uma vez que os plugues estão secos).

Os ensaios elastodinâmicos medem as velocidades de propagação das ondas P, S₁ e S₂ nos plugues de rocha. Para isto foi utilizado o sistema Autolab500®, que permite

realizar medições sob condições controladas de pressão confinante, pressão de poros e temperatura.

Os ensaios aqui relatados foram realizados com as amostras secas, sob temperatura e pressão de poros nas condições normais do ambiente, e com pressão confinante de 10 MPa.

Análise da composição mineral

A análise da composição mineral das amostras de tufa carbonática neste trabalho seguiu o procedimento aplicado por COUTO ET AL. (2012), que o aplicou na determinação do teor de minério de ferro em amostras submetidas previamente a ensaios de picnometria.

Os plugues de tufa carbonática analisados possuem uma matriz mineral composta basicamente por calcita e matéria orgânica. Esta composição foi determinada através da interpretação de imagens de microtomografia de raios x, como a mostrada na Figura 2.

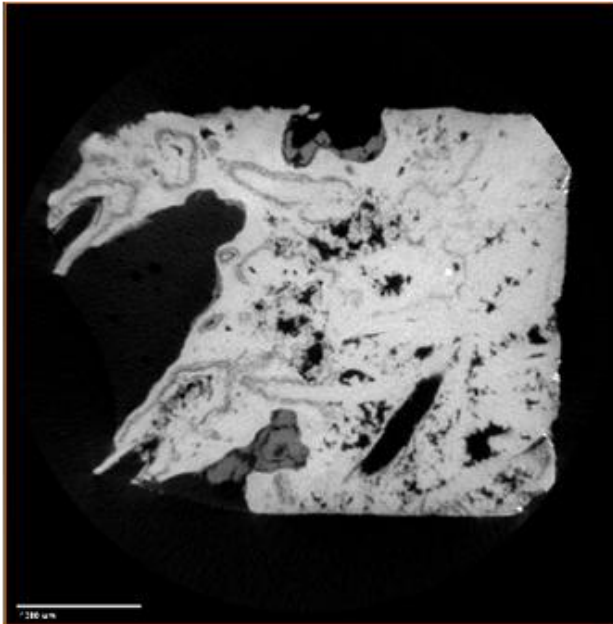


Figura 2 – Imagem de uma fatia microtomográfica de tufa carbonática do afloramento Cachoeira Roncador.

Uma vez que os plugues se encontram secos, ou seja, a densidade do fluido contido em seus poros pode ser considerada desprezível, a densidade total de um dado plugue pode ser dada por

$$\rho_B = \rho_G (1 - \phi) \quad (1)$$

onde ρ_G é a densidade de grãos e ϕ é a porosidade.

A densidade de grãos ρ_G é uma média ponderada das densidades dos componentes da matriz, ou seja,

$$\rho_G = FV_{\text{calc}} \rho_{\text{calc}} + FV_{\text{mo}} \rho_{\text{mo}} \quad (2)$$

onde ρ_{calc} e ρ_{mo} são, respectivamente, as densidades da calcita e da matéria orgânica. A densidade da calcita foi adotada como igual a 2,71 g/cm³ (DANA, 1974) e a densidade da matéria orgânica foi estabelecida através da análise das imagens de microtomografia de raios x, sendo adotado o valor de 1,92 g/cm³. FV_{calc} e FV_{mo} são as frações volumétricas de calcita e matéria orgânica, respectivamente, que compõem a amostra de tufa carbonática.

Substituindo a equação (2) na equação (1) e considerando que $FV_{\text{calc}} = 1 - FV_{\text{mo}}$, temos:

$$\rho_B = (FV_{\text{mo}} \rho_{\text{mo}} + (1 - FV_{\text{mo}}) \rho_{\text{calc}}) (1 - \phi) \quad (3)$$

Que por sua vez pode ser reescrita como,

$$\rho_B = (FV_{\text{mo}} (\rho_{\text{mo}} - \rho_{\text{calc}}) + \rho_{\text{calc}}) (1 - \phi) \quad (4)$$

ou

$$\rho_B = FV_{\text{mo}} (\rho_{\text{mo}} - \rho_{\text{calc}}) (1 - \phi) + \rho_{\text{calc}} (1 - \phi) \quad (5)$$

Que finalmente resulta em:

$$FV_{\text{mo}} = \frac{\rho_B - \rho_{\text{calc}} (1 - \phi)}{(\rho_{\text{mo}} - \rho_{\text{calc}}) (1 - \phi)} \quad (6)$$

Deste modo podemos calcular a fração volumétrica de matéria orgânica pela equação (6) e, conseqüentemente, a fração volumétrica de calcita, uma vez que estas frações são complementares.

A determinação da densidade da matéria orgânica foi realizada através da análise das imagens de microtomografia de raios x. Nestas imagens grãos de maior densidade aparecem com tons de cinza mais claros, devido à maior atenuação da energia, e grãos menos densos, como os de matéria orgânica, são representados por tons de cinza mais escuros. Uma vez que a escala de tons de cinza varia desde o zero (preto absoluto) até o 255 (branco absoluto), é possível estabelecer uma relação entre os tons de cinza de cada pixel das imagens com a densidade do material que ele representa, desde que se conheçam pelo menos três pontos de calibração. Neste trabalho foram utilizados para calibração os valores apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Valores usados para calibração da relação entre tons de cinza e densidade de grãos.

Componente	Tom de cinza predominante	Densidade (g/cm ³)
Poros	0	0,00
Calcita	214	2,71
Ankerita	252	3,00

Utilizando os valores de calibração do Quadro 1, construiu-se o gráfico da Figura 3, no qual se obteve uma função não-linear de regressão. O tom de cinza predominante nos grãos de matéria orgânica é 120. Aplicando este valor à função de regressão estima-se a densidade da matéria orgânica em 1,92 g/cm³.

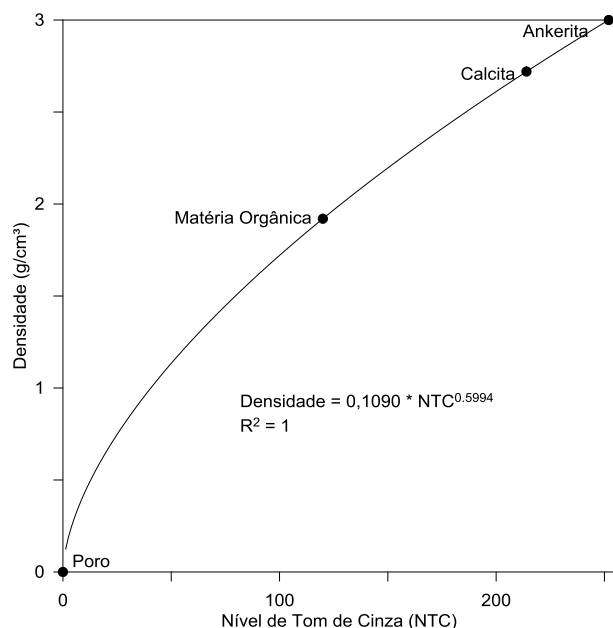


Figura 3 – Relação entre os tons de cinza e a densidade dos componentes de uma amostra de tufa carbonática do afloramento Cachoeira Roncador.

O teor de ankerita nas amostras apresenta um valor muito baixo (menor que 0,01%), de tal modo que ela é desprezada para fins de cálculo da composição mineral das amostras, sendo utilizada apenas na definição da relação entre a densidade e o nível de tom de cinza nas imagens microtomográficas.

O Quadro 2 apresenta as frações volumétricas de calcita e de matéria orgânica determinadas para as dezoito amostras de tufa carbonáticas analisadas neste trabalho. Nele se observa que os teores de matéria orgânica são relativamente homogêneos, variando entre 7,8% e 12,5%. Esta relativa homogeneidade na composição mineral já era esperada uma vez que se trata de amostras de um mesmo afloramento.

Quadro 2 – Frações volumétricas de calcita e de matéria orgânica determinadas para todas as amostras analisadas.

Amostra	Fração volumétrica de calcita	Fração volumétrica de matéria orgânica
A_CR1_A_08	0.875	0.125
A_CR1A_10	0.891	0.109
A_CR2_B_08	0.900	0.100
A_CR2_G_03	0.889	0.111
A_CR2_H_01	0.894	0.106
A_CR2_H_04	0.902	0.098
A_CR2_HI_10	0.922	0.078
A_CR2_V_02	0.912	0.088
A_CR2B_09	0.888	0.112
A_CR2D_01	0.896	0.104
A_CR2D_02	0.911	0.089
A_CR2D_03	0.898	0.102
A_CR2D_11	0.901	0.099
A_CR2HI_01	0.901	0.099
A_CR2HI_03	0.893	0.107
A_CR2HI_04	0.911	0.089
A_CR2V_01	0.921	0.079
A_CR2V_03	0.915	0.085

Propriedades elásticas dos contatos de grão

A qualidade mecânica dos contatos de grão é analisada neste trabalho através de suas velocidades elásticas. A ideia central é que, em amostras secas, além da porosidade, há uma forte influência dos contatos entre os grãos na definição das velocidades de propagação das ondas elásticas. Desta forma, um contato de maior rigidez, provavelmente devido à ação de cimentação, apresenta uma alta velocidade de onda, o que resulta também em alta velocidade de propagação na amostra como um todo. Por outro lado, um contato menos rígido, induz velocidades elásticas mais baixas para a rocha, mesmo que a sua porosidade seja relativamente baixa.

Estes efeitos cruzados - porosidade e qualidade de contato de grãos - resultam em elevada dispersão nas relações entre as velocidades elásticas e a porosidade, conforme pode ser visto na Figura 4, a qual apresenta as velocidades de propagação da onda P em função da porosidade para as amostras de tufa analisadas neste trabalho. Observa-se nesta figura a dispersão ($R^2 = 0,75$) da VP com a porosidade, a qual é supostamente causada pela variação da qualidade dos contatos de grãos entre as diversas amostras analisadas.

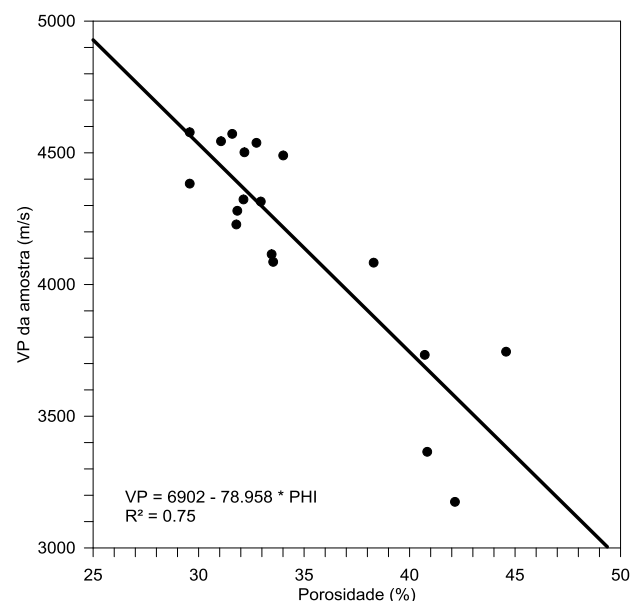


Figura 4 – Relação entre a velocidade da onda P e a porosidade das amostras de tufa carbonática do afloramento Cachoeira Roncador.

Considerando que as amostras de rocha se encontram secas, propõe-se neste trabalho que o tempo de trânsito da onda compressional na amostra de rocha depende da porosidade segundo a equação 7.

$$\Delta t_P = \Delta t_{ma} (1 - \phi) + \Delta t_{cg} \phi \quad (7)$$

onde Δt_P é o tempo de trânsito da onda P na amostra de rocha, Δt_{ma} é o tempo de trânsito da onda P da matriz mineral, Δt_{cg} é o tempo de trânsito da onda P dos contatos de grão e ϕ é a porosidade.

Rearranjando a equação (7), temos:

$$\Delta t_P = (\Delta t_{cg} - \Delta t_{ma})\phi + \Delta t_{ma} \quad (8)$$

A equação (8) é a equação de uma reta cujo coeficiente angular é $(\Delta t_{cg} - \Delta t_{ma})$ e coeficiente linear é igual a Δt_{ma} .

Os valores de Δt_{ma} são calculados a partir dos módulos de onda P e da densidade da matriz (SHERIFF, 1991; SOARES, 1992). O módulo da matriz foi considerado como sendo a média dos módulos da calcita e da matéria orgânica. Esta média é ponderada pelas frações volumétricas dos constituintes da matriz mineral.

Para o cálculo dos módulos elásticos dos constituintes da matriz foram adotadas as propriedades listadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Propriedades físicas adotadas para o cálculo dos módulos elásticos dos constituintes da matriz mineral.

Constituinte	Densidade (g/cm ³)	VP (m/s)	VS (m/s)
Calcita	2,71	6800	3400
Matéria orgânica	1,92	2900	1300

Uma vez conhecidos os valores de Δt_{ma} calculam-se diretamente os respectivos valores de Δt_{cg} a partir da equação (8) e, conseqüentemente, as velocidades dos contatos de grão.

A Figura 5 apresenta a relação entre as velocidades da onda S₁ com a porosidade. De modo semelhante ao ocorrido com a onda P (Figura 4), também se observa uma grande dispersão nesta relação (R² = 0,44). Esta dispersão também é supostamente causada pela variação da qualidade dos contatos entre os grãos. A qualidade dos contatos de grãos pode ser controlada pelo nível de cimentação ou ocorrência em maior ou menor grau de microporosidade, o que, da mesma forma, resulta em variações no nível de coesão e rigidez das amostras.

Influência dos contatos de grão sobre as velocidades

Construindo-se o gráfico das velocidades dos contatos de grão contra a porosidade, determina-se a sua função de regressão linear. Em seguida calcula-se o resíduo entre os valores de velocidade dos contatos de grão e a sua respectiva função de regressão. A velocidade corrigida da amostra, para excluir o efeito da qualidade de contato de grão, é dada pela diferença entre a velocidade medida e este resíduo.

A Figura 6 apresenta a velocidade da onda P calculada para os contatos de grão (azul), além das velocidades medidas nas amostras (preto). Observa-se que para um dado valor de porosidade podem ocorrer diferentes valores de velocidade medida, o que resulta em um coeficiente de determinação igual a 0,75. Observa-se também que quando a velocidade medida para uma dada amostra se encontra acima da linha de regressão preta a velocidade correspondente do contato de grão também se encontra acima da linha de regressão azul. O mesmo

ocorre para as amostras abaixo das respectivas linhas de regressão. Isto indica que a velocidade da amostra é maior do que a média quando a velocidade dos seus contatos de grão também é maior do que o valor esperado dado pela linha de regressão. Nota-se que a dispersão (R² = 0,37) das velocidades dos contatos de grão é ainda maior que a dispersão das velocidades medidas nas amostras.

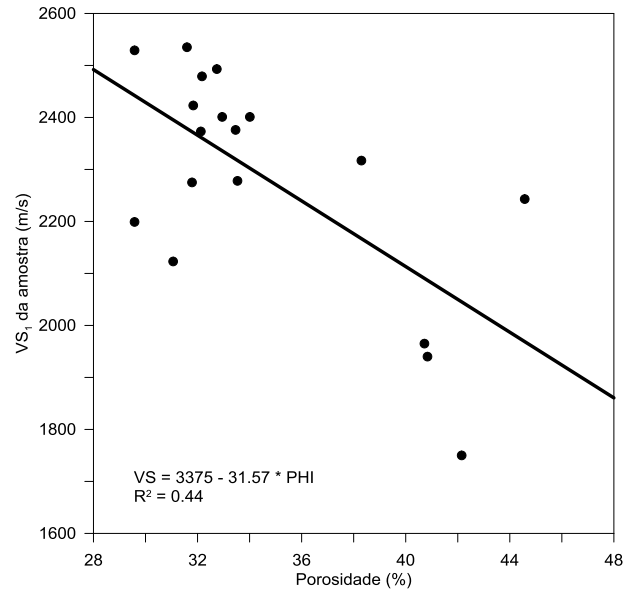


Figura 5 – Relação entre a velocidade da onda S₁ e a porosidade das amostras de tufa carbonática do afloramento Cachoeira Roncador.

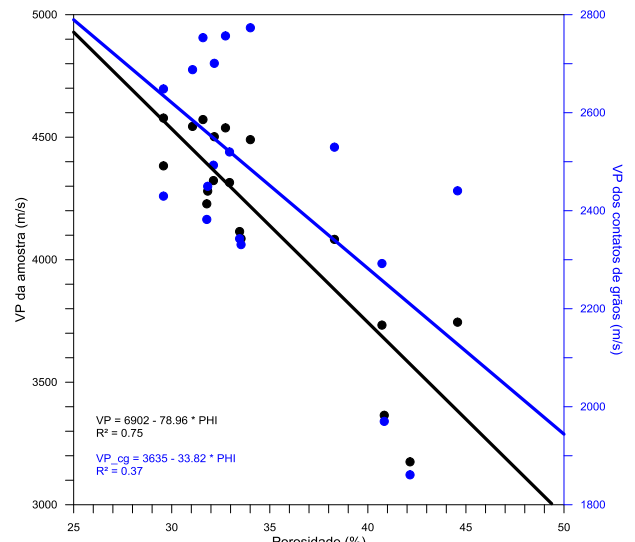


Figura 6 – Relações entre a velocidade da onda P medida nas amostras (preto) e calculada para os contatos de grão (azul) versus a porosidade.

A Figura 7 apresenta resultado semelhante ao da Figura 6, só que agora para a velocidade da onda S₁. A dispersão das velocidades da onda S dos contatos de grão é ainda maior (R² = 0,086).

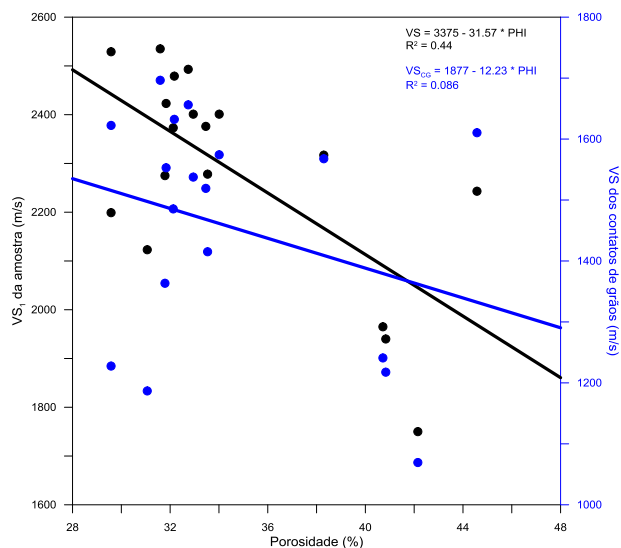


Figura 7 – Relações entre a velocidade da onda S_1 medida nas amostras (preto) e calculada para os contatos de grão (azul) versus a porosidade.

As figuras 8 e 9 apresentam as velocidades VP e VS_1 , respectivamente, corrigidas para excluir o efeito da variação da qualidade dos contatos de grãos, contra a porosidade. Nestas figuras as velocidades medidas são representadas pelos pontos pretos e as velocidades corrigidas pelos pontos vermelhos.

O método aqui proposto reduziu de forma significativa a dispersão das relações entre as velocidades elásticas e a porosidade. No caso da onda P o coeficiente de determinação passou de 0,75, antes da correção, para 0,99 após a correção. Já no caso da onda S_1 o coeficiente de determinação aumentou de 0,44 para 0,98.

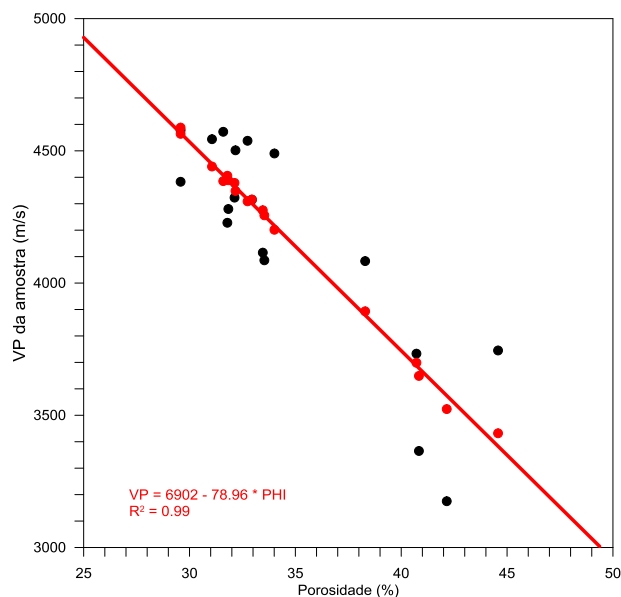


Figura 8 – Relação entre a velocidade da onda P e a porosidade para as amostras de tufa calcária antes (preto) e depois (vermelho) da correção do efeito da qualidade dos contatos de grãos.

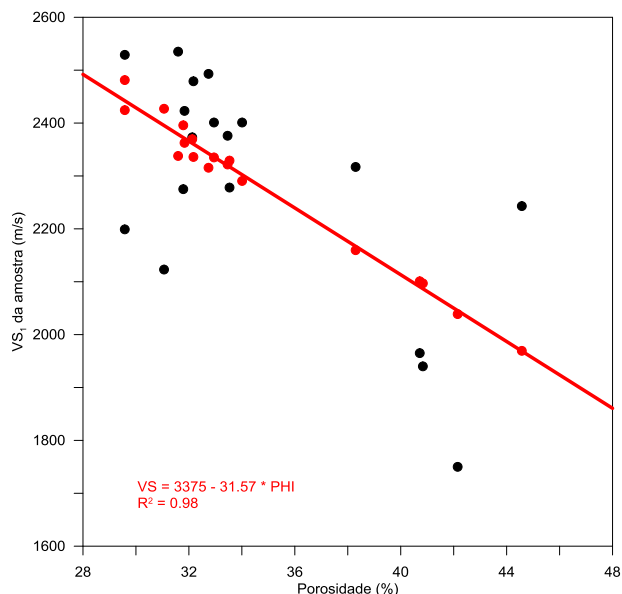


Figura 9 – Relação entre a velocidade da onda S_1 e a porosidade para as amostras de tufa calcária antes (preto) e depois (vermelho) da correção do efeito da qualidade dos contatos de grãos.

Conclusões

Neste artigo foi demonstrada uma nova técnica para a avaliação da composição mineral e do efeito da qualidade dos contatos de grãos sobre a dispersão das relações entre as velocidades elásticas e a porosidade. Esta técnica se baseia na análise dos dados de porosidade e de densidade de grãos, medidas através de picnometria gasosa em plugues de rocha, e de imagens de fragmentos milimétricos de rocha obtidas por microtomografia de raios x.

O método se mostrou eficiente para a análise composicional e de qualidade de contatos de grãos para rochas com até dois componentes minerais em sua matriz. No caso das amostras de tufa carbonática estudadas neste trabalho os componentes considerados foram calcita e matéria orgânica. A densidade da calcita foi considerada como igual a $2,71 \text{ g/cm}^3$ e a densidade da matéria orgânica, obtida a partir do seu tom de cinza e da função de regressão obtida, foi determinada como sendo igual a $1,92 \text{ g/cm}^3$. A análise da composição mineral indicou frações volumétricas entre 87,5% a 92,2% de calcita, sendo a fração complementar composta por matéria orgânica.

A avaliação da qualidade dos contatos de grãos ocorreu através da análise da dispersão entre as velocidades elásticas e a porosidade das várias amostras. Considerando que a dispersão se dá por causa dessa variação de qualidade dos contatos de grão, a qualidade dos contatos foi mensurada através das suas velocidades elásticas. Por fim, aplicando uma correção nas velocidades medidas a fim de excluir o efeito dos contatos de grão, as dispersões nas relações entre as

velocidades elásticas e a porosidade foram drasticamente reduzidas.

O método de avaliação da qualidade dos contatos de grãos aqui proposto apresenta potencial para ser utilizado no mapeamento da distribuição espacial de propriedades geomecânicas, o que é especialmente importante no caso de reservatórios de baixo grau de homogeneidade, como ocorre nos reservatórios carbonáticos do pré-sal brasileiro.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao convênio PETROBRAS/UFCEG TC 0050.0078516.12.9 pelo financiamento da pesquisa e à PETROBRAS pela permissão para publicação destes resultados.

Referências

COUTO, H.J.B.; BRAGA, P.F.A.; FRANÇA, S.C.A. (2012). Use of gas pycnometry for estimating the iron content in mineral samples. *Minerals Engineering*, 39, 45-47. Elsevier.

DANA, J.D. (1974). *Manual de Mineralogia*. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro.

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

PEDLEY, M. (2009). Tufas and travertines of the Mediterranean region: a testing ground for freshwater carbonate concepts and developments. *Sedimentology*, 56, 221-246.

REYES-PEREZ, Y.A.; LIMA FILHO, F.P.; SANTANNA, L.G.; BEZERRA, F.H.R.; CÓRDOBA, V.C.; MENEZES, L.; SOUZA, A.M. (2003). Tufas calcárias na Bacia Potiguar, Nordeste do Brasil. In: IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário. Recife-PE: ABÉQUA, 2003. v. CD. p. 1-4.

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.