

Copyright 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico Científico foi preparado para apresentação no 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, a ser realizado no período de 2 a 5 de outubro de 2005, em Salvador. Este Trabalho Técnico Científico foi selecionado e/ou revisado pela Comissão Científica, para apresentação no Evento. O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor (es) que este Trabalho será publicado nos Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás

PROPOSTA DE PREDIÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE PERMEABILIDADE EM UM ARENITO SILICICLÁSTICO FALHADO UTILIZANDO ATRIBUTOS DE GPR (GROUND-PENETRATING RADAR)

Andrea C. Damasceno¹, Aderson F. do Nascimento², Walter E. de Medeiros³

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, andreadamasceno@hotmail.com.

² Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, aderson@dfte.ufrn.br.

³ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, walter@dfte.ufrn.br.

Resumo – Conhecer a distribuição de permeabilidade de um meio permite identificar os mais prováveis caminhos percorridos pelo fluido e, dessa maneira, obter um modelo dinâmico de reservatório, para melhor caracterizar as propriedades hidráulicas deste meio. O estudo de análogos de reservatórios de hidrocarbonetos permite o uso de técnicas de investigação mais baratas e de alta resolução, tais como Radar de Penetração de Solo (GPR). Neste trabalho, estimaremos a distribuição de permeabilidade de um arenito siliciclástico falhado a partir de atributos de amplitude e frequência instantâneos de GPR. Serão determinadas relações estatísticas entre atributos de GPR e a distribuição de permeabilidade no arenito. Medidas *in situ* de permeabilidade permitirão calibrar essas relações, que serão então extrapoladas a todo o volume 3-D do corpo arenítico. O resultado deste procedimento será um cubo de GPR onde estará estimada a distribuição 3D de permeabilidade. Tal cubo de permeabilidade poderá ser utilizado como entrada em um simulador de fluxo. Assim, esperamos contribuir para um melhor entendimento do papel de fraturas no escoamento de fluidos em reservatórios.

Palavras-Chave: bandas de deformação; atributos de GPR; análise de multiatributos

Abstract – With the knowledge of the permeability distribution from a media one can identify the most probable fluid paths. In this way, one can obtain a dynamic reservoir model that is helpful to characterize the hydraulic medium properties. Hydrocarbon analog reservoir studies allow the use of cheaper and high-resolution investigation techniques such as Ground-Penetrating Radar (GPR). In this paper, we are going to estimate the permeability distribution of faulted siliciclastic sandstone from instantaneous amplitude and frequency attributes of GPR data. Statistical relationships are determined between GPR attributes and sandstone permeability distribution. Permeability *in situ* measurements are used to calibrate these relationships. These relationships are, in turn, extrapolated for the entire sandstone 3-D volume body. The result of this procedure is a GPR cube where the permeability 3-D distribution is estimated. This permeability cube may be used as an input for reservoir flow simulation. Thus, we trust to provide a better understanding of the role of faulting in the reservoir fluid flow analysis.

Keywords: deformation bands, GPR attributes, multattribute analysis

1. Introdução

Conhecer a distribuição de permeabilidade do meio é um dos principais objetivos da caracterização de reservatórios. De posse dessa distribuição, é possível identificar os mais prováveis caminhos percorridos pelos fluidos e otimizar a extração de fluidos deste meio. Medidas de permeabilidade *in situ* foram feitas utilizando equipamentos como, por exemplo, o minipermeâmetro (Brandão, 2004), em um análogo de reservatório. No entanto, essas medidas são pontuais e realizadas em testemunhos retirados dos poços.

O estudo de afloramentos análogos de reservatório tem sido tema de vários trabalhos na literatura. Eles têm a vantagem de serem bastante acessíveis, permitindo a utilização de técnicas mais baratas e de alta resolução como a do Radar de Penetração de Solo (GPR). O análogo em estudo pertence à bacia de Tucano, porção centro-norte do estado da Bahia. A ação tectônica na área ocasionou deformação de algumas regiões formando Bandas de Deformação, associadas à redução de permeabilidade (Antonellini *et al.*, 1994). Dessa forma, os contrastes de permeabilidade a serem mapeados se devem à diferença de permeabilidade entre rocha sã e rocha deformada.

Existem relações diretas entre o conteúdo de atributos de GPR, após processamento adequado, e propriedades elétricas de subsuperfície. Essas propriedades, por sua vez, são dependentes de fatores petrofísicos tal como a porosidade (Φ) e permeabilidade (K) (Corbeanu *et al.*, 2002). Como ilustrado no esquema abaixo, a proposta desse trabalho é a de utilizar a análise de multiatributos, combinando atributos de amplitude (A) e frequência (ω) instantâneos com objetivo de fazer um mapeamento de permeabilidade do meio.

$$A, \omega \Rightarrow K$$

Esse trabalho utilizará a proposta inicial de Corbeanu *et al.* (2002), onde a autora usa atributos de GPR para prever a distribuição de permeabilidade em arenito. Nossa proposta difere da proposta da autora quanto à área estudada. Pretendemos mapear a distribuição de permeabilidade associada um arenito intensamente deformado.

2. Área de Estudo

A bacia de Tucano, localizada na porção centro-norte do estado da Bahia, é uma das bacias constituintes do *rift* do Recôncavo-Tucano-Jatobá. Trata-se de um *rift* intracontinental, que evoluiu como um braço abortado da ruptura continental que originou o Oceano Atlântico Sul. Englobando uma área de aproximadamente 30.500 km², a bacia encontra-se dividida em três sub-bacias, Tucano Sul, Central e Norte, separadas, entre si, pelos cursos dos rios Itapicuru e Vaza-Barris, respectivamente (Magnavita *et al.*, 2003).

O afloramento alvo deste trabalho se constitui de um arenito siliciclastico do Grupo Ilhas, geologicamente contextualizado no Arco de Vaza-Barris, entre as sub-bacias do Tucano Norte e Central. As estruturas sedimentares presentes no corpo permitem que interpretação de um sistema deltaico. A área de interesse, destacada em vermelho no mapa geológico da Figura 1, dista cerca 40 km do município de Jeremoabo.



Figura 1. Mapa geológico simplificado das bacias do Recôncavo, Tucano e Jatobá. Em destaque a área de interesse deste projeto. FONTE: http://www.phoenix.org.br/Phoenix52_Abr03.htm.

3. Bandas de Deformação

Segundo Aydin (1978), bandas de deformação são pequenas falhas que se desenvolvem em materiais granulares e porosos, sendo umas das mais comuns estruturas encontradas em arenitos. Aydin (1978) ressalta que essas estruturas podem ter rejeito centimétricos. Estes processos de deformação apresentam sob o relevo feições acentuadas, com cores esbranquiçadas, devido ao fraturamento dos grãos de quartzo.

Tais estruturas não ocorrem na natureza como um único exemplar. Comumente ocorrem agrupadas, formando as chamadas zonas de bandas de deformação, podendo evoluir para superfícies de deslizamentos.

Devido à ação tectônica, arenitos podem sofrer intensa deformação, apresentando as chamadas *bandas de deformação*. O estudo dessas bandas de deformação é bastante importante porque elas são um dos possíveis mecanismos de formação de falhas. A acumulação de rejeito dessas falhas se dá pela adição de novas bandas.

A figura 2 mostra como variam porosidade e permeabilidade em função da deformação da rocha. Segundo Antonellini *et al.* (1994), em bandas de deformação com bom desenvolvimento de cataclase e conteúdo de argila, as permeabilidades podem atingir patamares menores que três vezes a permeabilidade da rocha sã na direção perpendicular a estrutura. Portanto as bandas de deformação podem funcionar como barreiras de fluxo de fluido. Próximo às estruturas de deformação ocorre diminuição de porosidade devido a cominuição dos grãos por cataclasamento.

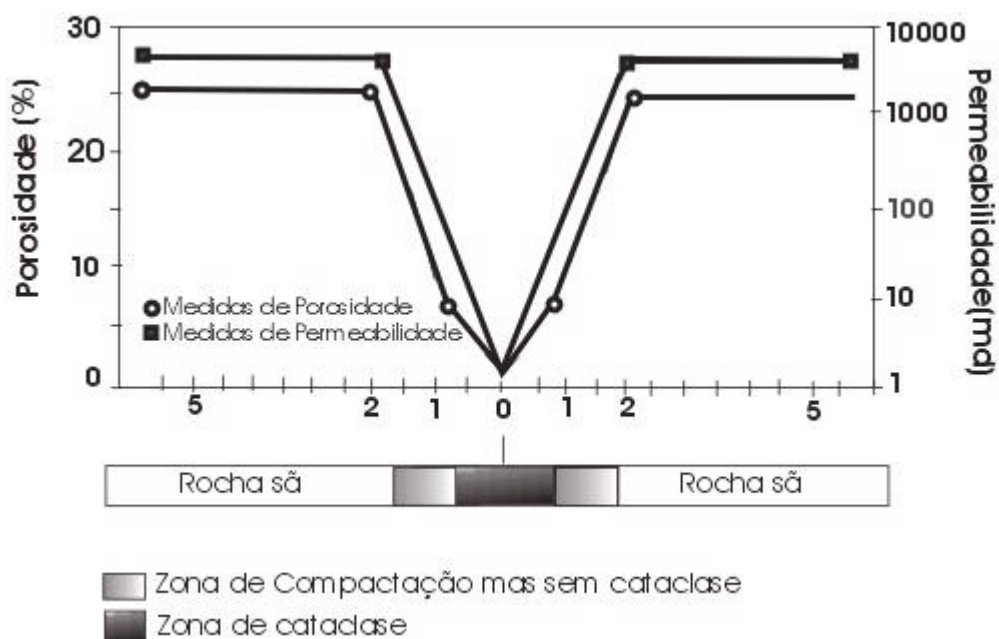


Figura 2. Perfis de porosidade e permeabilidade através de bandas de deformação em arenitos da Formação Estrada (Membro Moab) no *Delicate Arch*, Utah. FONTE: Modificado de Antonellini *et al.*, (1994).

4. Atributos de GPR e Predição de Permeabilidade

Atributos de GPR são todas as informações obtidas dos dados de GPR, seja por medidas diretas ou por raciocínio lógico ou baseado na experiência. A utilização de atributos como ferramenta de interpretação nasceu na sísmica e foi posteriormente aplicada para GPR (Barnes, 2001).

A utilização do GPR para caracterização tridimensional de propriedades de rocha em afloramentos foi demonstrada por Baker e Monash (1991), Gawthorpe *et al.* (1993), and McMechan *et al.* (1997). Estudos de GPR têm demonstrado o potencial de descrição de geometrias estratigráficas em ambientes deposicionais (Gawthorpe *et al.*, 1993). Outros estudos têm investigado o potencial do GPR para a estimativa de propriedades de rocha. Porém, poucos estudos foram realizados na interpretação de dados de GPR utilizando atributos tais como amplitude, frequência, fase e mergulho.

Taner *et al* (1979) propõe que o convencional traço sísmico possa ser visto como a componente real de um traço complexo. Dessa forma, o traço complexo poderia ser escrito como

$$F(t) = f(t) + if^*(t) \quad (1)$$

Onde $F(t)$ é o traço complexo, composto por uma componente real $f(t)$ e uma componente complexa $f^*(t)$. A parte real $f(t)$ pode ser expressa por

$$f(t) = A(t) \cos \theta(t) . \quad (2)$$

onde $A(t)$ é a amplitude instantânea e $\theta(t)$ a fase instantânea. A parte complexa, definida como o complexo conjugado da parte real, pode ser expressa por

$$f^*(t) = A(t) \sin \theta(t) \quad (3)$$

O uso do traço complexo $F(t)$ permite definir amplitude instantânea, fase e frequência como extensões lógicas da definição desses termos para um simples Oscilador Harmônico Simples. Os atributos de GPR que utilizaremos nesse trabalho são amplitude e frequência instantâneos.

A amplitude instantânea, também chamada de envelope de traço, é definida por como

$$A(t) = |F(t)|. \quad (4)$$

Já a frequência instantânea é definida como sendo a derivada temporal da fase instantânea, ou seja,

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = \omega(t). \quad (5)$$

Estas relações, provenientes da sísmica, podem ser extendidas para utilização em GPR. Existem relações diretas entre o conteúdo de atributos de GPR, após processamento adequado, e propriedades elétricas de subsuperfície. Essas propriedades, por sua vez, são dependentes de fatores petrofísicos tal como a permeabilidade. Corbeanu *et al* (2002), propõe a utilização de uma regressão linear que melhor ajuste a curva de medida de permeabilidade e os atributos de GPR de amplitude e frequência instantâneos para estimar as tendências de variações de permeabilidade no análogo. Esta proposta será utilizada para o estudo do nosso análogo de reservatório na Bacia de Tucano.

5. Metodologia Utilizada

Medidas de permeabilidade no reservatório análogo em estudo, já foram coletadas utilizando o minipermeâmetro, ao longo de poços verticais (Brandão, 2004). Essas medidas são limitadas aos poços, fornecendo apenas informações localizadas sobre a distribuição de permeabilidade do meio. Brandão (2004) utilizou amplitude instantânea para localizar as bandas de deformação nos dados de GPR e associá-las as medidas pontuais de permeabilidade na superfície. Em nosso trabalho, pretendemos combinar um atributo de GPR a mais (amplitude e frequência instantâneos) para estimar K em regiões onde não existem medidas *in situ* dessa propriedade. Nos pontos onde existirem medidas, estes serão utilizados para calibração. Essa técnica é conhecida como Análise de Multiatributos. Russell & Hampson (1997) define-a como sendo todos os métodos geológicos/geofísicos que utilizam mais do que um atributo para predizer alguma propriedade física da terra. Essa abordagem, chamada de metodologia dirigida aos dados, está resumida no esquema mostrado na figura 3.

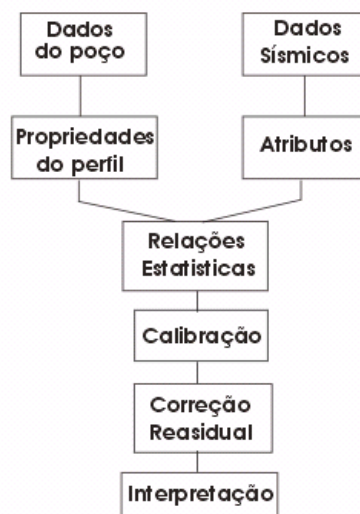


Figura 3. A interpretação estatística dirigida aos dados. FONTE: Russell & Hampson (1997)

A permeabilidade tem uma distribuição logarítmica, portanto a relação estatística que utilizaremos para relacioná-la aos atributos de amplitude e frequência instantâneos é dada pela equação (6). A calibração é realizada correlacionando as medidas de permeabilidade com os dois atributos nos poços.

$$\ln[K(x, y, z)] = c_0 + c_1 A + c_2 \omega, \quad (6)$$

onde c_0 , c_1 e c_2 são coeficientes de ponderação entre os atributos e a permeabilidade, $\ln[K(x,y,z)]$ é o logaritmo natural da permeabilidade, e A e ω são amplitude e frequência instantâneos, respectivamente, calculados dos dados de GPR.

Os coeficientes da equação (6) serão determinados em cada poço utilizando-se um ajuste de mínimos quadrados. Então, calibramos esses valores determinados lançando-os na equação (6) e comparando as distribuições assim obtidas com as medidas do minipermeâmetro para o mesmo poço. Depois disto, interpola-se esses coeficientes ao longo do volume 3-D. Corbeanu utilizou um interpolador tipo inverso da distância, desse modo, considera-se que serão menos influentes na estimativa de permeabilidade, regiões mais afastadas dos poços de controle. O erro RMS deve ser calculado, para cada poço de controle, de modo a determinar a qualidade do ajuste entre o parâmetro calculado e o estimado.

De posse dos valores dos coeficientes em todo o volume e do mapa de atributos, estima-se a permeabilidade para cada nó do *grid* utilizando a equação (6). O resultado será um cubo de GPR que mostra as variações de permeabilidade em todo o volume 3-D do reservatório análogo em estudo.

6. Resultado Esperados

Esse trabalho propõe a utilização de da técnica de análise de multiatributos para resolver o problema de estimar a distribuição de probabilidade em um arenito, análogo de reservatório, fora dos pontos de controle. Diferentemente dos trabalhos anteriores, trataremos de um arenito intensamente falhado. Dessa forma, esse trabalho viabilizará um melhor entendimento no papel das falhas e fraturas na distribuição de permeabilidade de um meio poroso. Pretendemos também utilizar o cubo de permeabilidade predita 3-D como entrada para um simulador de fluxo e, portanto melhor compreender como a distribuição de heterogeneidades influencia o escoamento de fluidos num reservatório.

7. Referências

- ANTONELLINI, M.A., AYDIN, A., 1994. Effect of faulting on fluid flow in porous sandstones: petrophysical proprieties. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 78, 355-377.
- AYDIM, A. 1978. Small Faults Formed as Deformation Bands in Sandstones. *Pageophy*, 116:913-930.
- BAKER, P. L., and MONASH, U., 1991, Fluid, lithology, geometry, and permeability information from ground-penetrating radar for some petroleum industry applications: *Soc. Petr. Eng.*, SPE 22976.
- BARNES, A., 2001. Seismic attributes in your facies. *CSEG Recorder*, September:41-47.
- BRANDÃO, H.C. 2004. Interpretação conjunta de dados de GPR e medidas de permeabilidade sobre um análogo de reservatório siliciclástico falhado na Bacia de Tucano, NE do Brasil. *Dissertação de Mestrado*, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- CORBEANU, R.M., MCMECHAN, G.A., SZERBIAK, R.B. and SOEGAARD, 2002, Prediction of fluid permeability and mudstone distributions from ground-penetrating radar (GPR) attributes: Example from the Cretaceous Ferron Sandstone Member, east-central Utah: *Geophysics*, 67, 1495-1504.
- GAWTHORPE, R. L., COLLIER, R.E.L., ALEXANDER, J., BRIDJE, J. S., and LEEDER, M.R., 1993, Ground penetrating radar : Application to sandbody geometry and heterogeneity studies, in North, C. P., and Prosser, D. J., Eds., *Characterization of fluvial and aeolian reservoirs: Geol. Soc. Special Publication*, 73, 421-432.
- MAGNAVITA, L., DESTRO, N., CARVALHO, M.S.S., MILHOMEM, P.S., SOUZA-LIMA, W., 2003, Bacias sedimentares brasileiras: Bacia de Tucano. *Phoenix*, 52, Ano 5, site: http://www.phoenix.org.br/Phoenix52_Abr03.html, visitado em 22/04/2005.
- MCMECHAN, G. A., GAYNOR, G.C., and SZERBIAK, R. B., 1997, Use of ground-penetrating radar for 3-D sedimentological characterization of clastic reservoir analog: *Geophysics*, 62, 786-796.
- RUSSELL, B., HAMPSON, D., SCHUELKE, J., and QUIREN, J., 1997, Multiattribute seismic analysis: *The Leading Edge*, 16, 1439-1443.
- TANER, M. T., KOEHLER, F., and SHERIFF, R. E., 1979, Complex seismic trace analysis: *Geophysics*, 44, 1041-1063.