

Orientação do Topo Estratigráfico de um Testemunho Horizontal através da Análise de Anisotropia Sísmica

Marcio Morschbacher, Julio Justen, Guilherme Vasquez, Marcos de Leão, Irapoan Alves, Petrobras, Cleide Bacelar, Fundação GORCEIX

Copyright 2009, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, August 24-28, 2009.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 11th 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

Neste trabalho estimamos a orientação estratigráfica de um intervalo de testemunho horizontal de rocha através da análise de anisotropia de velocidades sísmica (VelAn). Análises de tomografia computadorizada foram importantes para o controle de qualidade dos resultados. Os resultados obtidos concordam satisfatoriamente com a direção de orientação recuperada nos registros da sonda.

Introdução

Na área da indústria do petróleo, o conhecimento do campo de tensões *in situ* pode ser utilizado na estimativa da reserva *in place*, estabilidade de poços, locação de poços produtores e injetores, fraturamento hidráulico, dentre outras aplicações. Diversos estudos geológicos e ensaios físicos são realizados a partir de testemunhos orientados de rocha coletados em poços pioneiros e de desenvolvimento. Contudo, em alguns casos pode ocorrer a perda do referencial para orientação do testemunho durante a operação de amostragem.

Este trabalho se refere à orientação estratigráfica de um testemunho de rocha carbonática, extraído de um trecho horizontal de um poço de petróleo no qual, devido à rotação do barrilete, somente um pequeno intervalo amostrado teve a orientação recuperada através dos registros da sonda. O método utilizado se baseia na análise da anisotropia de velocidades (VelAn) de propagação de ondas compressoriais.

Com a amostragem de um testemunho ocorre o alívio das tensões que atuam na rocha *in situ* causando a formação de uma série de microfissuras permanentes (Teufel, 1983). Considerando que, na situação *in situ*, a rocha homogênea está submetida a um campo de tensões anisotrópico, as microfissuras geradas estarão preferencialmente orientadas na direção perpendicular à direção original de maior tensão. A orientação preferencial das microfissuras gera uma variação da velocidade de ondas com o ângulo em torno do eixo do testemunho (Rathore *et al.*, 1994). Esta metodologia, conhecida por VelAn, já foi testada e utilizada em vários estudos para determinar a direção principal de tensão *in situ* (Soares *et al.*, 1996; Velloso *et al.*, 2001; Bloch *et al.*, 2005). Além de ser bastante simples e de rápida

execução, uma grande vantagem da técnica VelAn frente a outras técnicas é que ela pode ser aplicada em qualquer tempo após a testemunhagem (Soares *et al.*, 1996).

Os resultados obtidos pela análise de VelAn concordam satisfatoriamente com a direção estratigráfica do testemunho recuperada através dos registros durante a sondagem. Validada, a metodologia VelAn poderá ser utilizada em outros casos similares.

Metodologia de ensaio

A técnica aplicada, denominada VelAn ("Velocity Anisotropy"), consiste na medida da velocidade de propagação de ondas em diversas direções radiais numa amostra cilíndrica a fim de se determinar as direções de máxima e mínima velocidade, que estariam relacionadas às direções das tensões principais pré-existentes no plano radial da amostra. Neste método, supõe-se que a rocha originalmente, antes da testemunhagem, é homogênea e isotrópica.

Supondo que a tensão vertical é a tensão máxima σ_{max} , então numa amostra de testemunho horizontal as microfissuras estarão preferencialmente orientadas no plano horizontal, e a direção de menor velocidade será a direção vertical (Figura 1). Neste caso a técnica VelAn apenas indicará a direção vertical; o sentido, ou seja, o topo e a base estratigráfica do testemunho devem ser inferidos através de outro método.

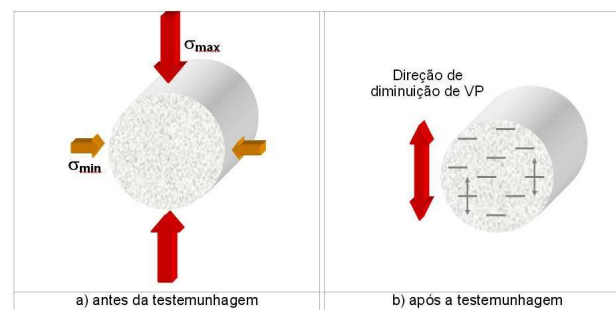


Figura 1 – Esquema ilustrativo do desenvolvimento de fissuras internas geradas pelo alívio das tensões.

Uma fotografia do aparato experimental utilizado nos ensaios de VelAn em testemunhos está ilustrada na Figura 2. O testemunho é montado numa base móvel, de forma que diversas direções podem ser ensaiadas, com incrementos mínimos de 5 graus. O sistema fixo é composto por peças metálicas especiais (*caps*) que

contêm os transdutores piezelétricos, posicionados em direções diametralmente opostas do testemunho. Acionadores pneumáticos de baixa pressão (5 bar) são utilizados para acoplar o *cap* à superfície da rocha, garantindo assim que todos os ensaios nas diferentes direções sejam realizados na mesma condição. Outro artifício utilizado com o objetivo de melhorar o acoplamento acústico consiste em revestir a superfície de contato dos *caps* com folhas de chumbo, e mantê-la lubrificada por meio de um fluido acoplante.

O sistema de aquisição de dados é composto por um gerador de pulsos e um amplificador de potência, os quais fornecem um sinal conhecido ao transdutor piezelétrico. O transdutor emissor transforma esse sinal em vibração mecânica com frequência ultra-sônica. Após percorrer o testemunho, a onda chega ao transdutor receptor, quando então é novamente transformada em sinal elétrico que é analisado no osciloscópio.



Figura 2 – Fotografia do equipamento utilizado nos ensaios de VelAn em testemunhos.

Durante o ensaio determina-se o intervalo de tempo Δt (tempo de trânsito) gasto pela onda compressional para percorrer o diâmetro Δx do testemunho em cada direção avaliada. A velocidade da onda compressional será dada por $VP = (\Delta x / \Delta t)$. Muitas vezes os resultados são expressos em termos da vagarosidade da onda compressional, dada por $Vag = (1 / VP)$.

Dessa forma, a direção da tensão principal no plano perpendicular ao eixo do testemunho, ou seja, a direção vertical do testemunho, neste caso, será aquela que apresentar máximo (mínimo) valor de vagarosidade (velocidade) da onda compressional.

Resultados

Foram realizados seis ensaios de VelAn num intervalo de testemunho de rocha carbonática de 1,8 metros retirado de um trecho horizontal de um poço de petróleo. Os ensaios foram realizados com o testemunho seco e à pressão ambiente.

Na Figura 3 apresentamos as formas de ondas registradas nas 18 direções investigadas para três das profundidades ensaiadas. Os pontos representam o tempo correspondente ao primeiro pico da onda registrada no transdutor receptor, sendo este valor utilizado no cálculo das velocidades. A diferença nos tempos de chegada é um indicativo da anisotropia do testemunho de rocha.

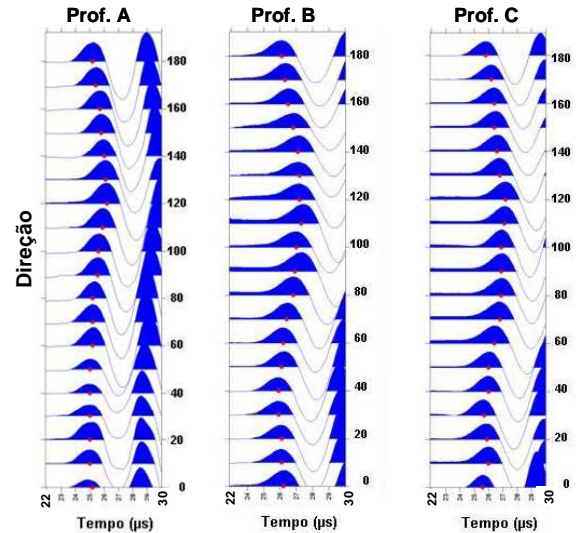


Figura 3 – Formas de ondas compressoriais registradas nas profundidades de ensaio A, B e C.

A Figura 4 apresenta a variação da velocidade com a direção de propagação da onda para os ensaios nas profundidades B e C. As curvas contínuas representam o ajuste de uma função periódica aos dados experimentais. Os valores são relativamente bem comportados, indicativo de que as amostras são homogêneas. Considerando o conjunto de ensaios realizados, a variação entre as velocidades máxima e mínima está na faixa de 4,5% a 6,5%. Conforme visto anteriormente, a premissa da técnica VelAn é de que essa variação de velocidade está associada às microfissuras provocadas pelo alívio das tensões por ocasião da testemunhagem.

A Figura 5 apresenta as variações da vagarosidade com a direção de propagação da onda para as seis profundidades ensaiadas. Pode-se observar que, exceto para a profundidade E, os ensaios exibem um comportamento bastante similar, com a direção de maior vagarosidade no intervalo entre 110° e 130°.

Análises de tomografia computadorizada foram realizadas para verificar a homogeneidade do testemunho de rocha. Heterogeneidades de baixa densidade, possivelmente *vugs*, foram identificadas na profundidade do ensaio E (Figura 6). De uma forma geral, um pulso sísmico se propaga com velocidade menor num meio com densidade mais baixa, o que pode explicar o resultado encontrado.

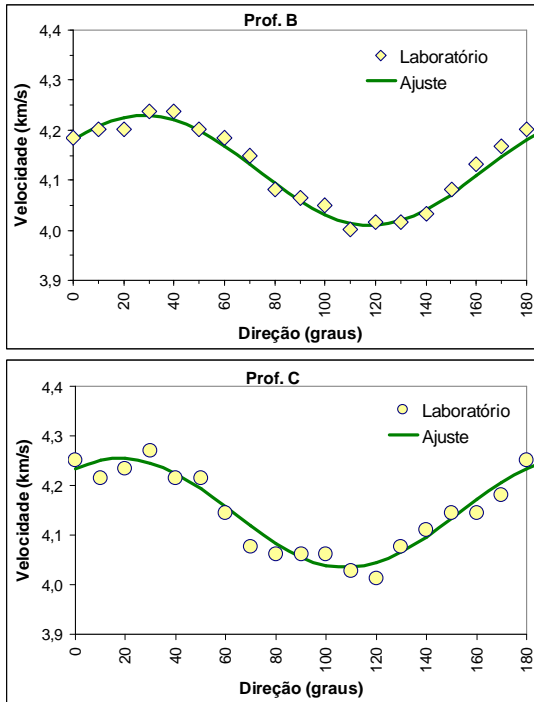


Figura 4 – Variação da velocidade com a direção de propagação das ondas compressoriais.

Para comparar os diferentes ensaios os valores de vagarosidade foram normalizados em relação ao máximo valor obtido em cada profundidade. Os resultados, exceto a profundidade E, são apresentados na Figura 7 e ilustram a boa correlação obtida entre os diversos ensaios. A direção de maior vagarosidade é representada pela linha $115 \pm 10^\circ \pm 295 \pm 10^\circ$. O resultado concorda satisfatoriamente com a direção do topo estratigráfico (330°) recuperada a partir de registros da sonda.

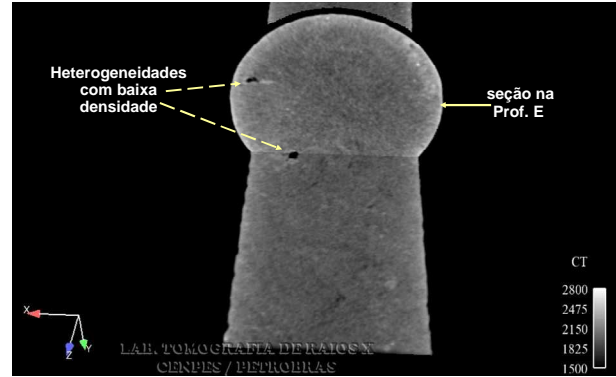


Figura 6 – Imagem de tomografia computadorizada 3D do testemunho ilustrando uma seção na direção longitudinal e outra transversal na profundidade E.

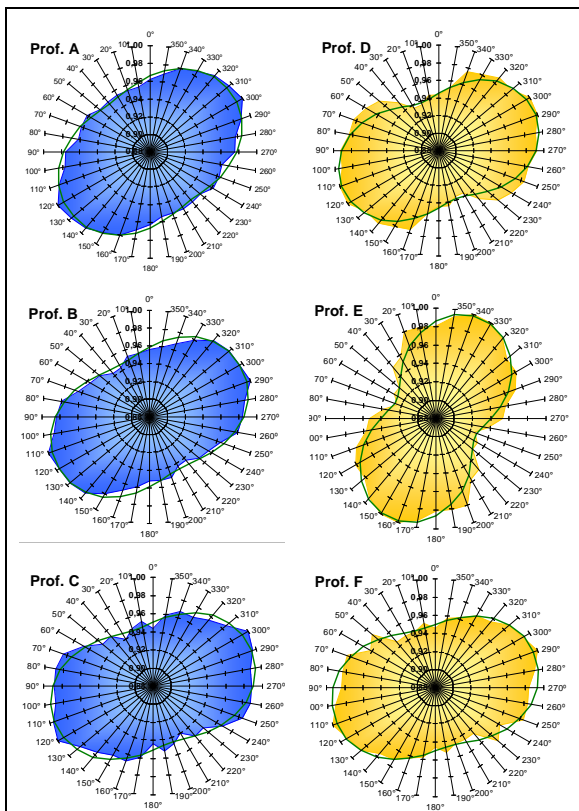


Figura 5 – Gráficos ilustrando a variação da vagarosidade com a direção de propagação das ondas. Ensaios realizados no sentido anti-horário.

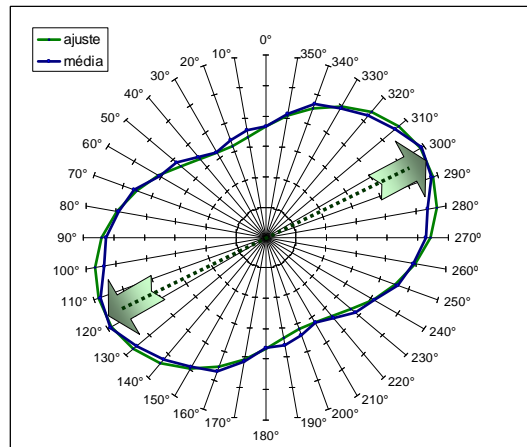
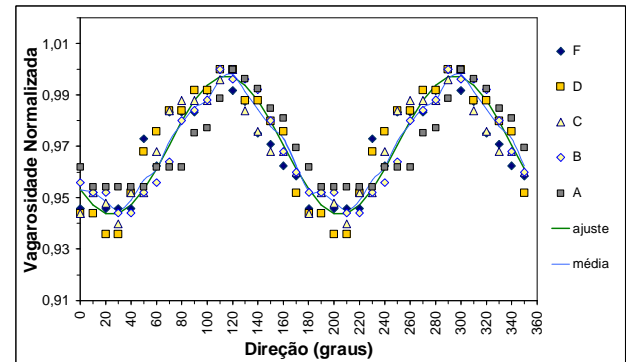


Figura 7 – Variação da vagarosidade normalizada com a direção de propagação da onda compressional. Ensaios realizados no sentido anti-horário.

Modelagem de heterogeneidades

Para estimar os efeitos de anisotropia gerados por heterogeneidades estão sendo avaliadas a construção de testemunhos sintéticos e também a realização de modelagens numéricas simulando a propagação ondas em meios heterogêneos. Neste último caso, os campos de velocidade podem ser elaborados a partir das imagens de tomografia computadorizada. Assim, os ensaios VelAn realizados em uma rocha com heterogeneidades, como no caso da Figura 6, poderiam ser re-interpretados.

Conclusões

Foi demonstrado neste trabalho que medidas de anisotropia de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em diversas direções radiais podem ser utilizadas para orientar estratigraficamente testemunhos de rochas mediante a premissa de que, na condição *in situ*, a rocha seja isotrópica e homogênea. O método também assume que a direção vertical seja uma direção principal de tensão *in situ*.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Petrobras pela oportunidade de divulgação deste trabalho e aos colegas Tagore Ostape pelos ensaios de VelAn; Elisabete Campos pelas análises de tomografia computadorizada; e Antonio Claudio Soares pelas discussões enriquecedoras.

Referências

- Bloch, M., S.M.S. Freitas, M. Socorro, J.A. Soares and C.J.R. Bacelar**, 2005, In-situ stress determination based upon borehole imaging and rock-sample analyses: a comparison among Anelastic Strain Recovery (ASR), acoustic velocity, and acoustic tomography. SPE Latin America and Caribbean Petroleum Engineering Conference Society of Petroleum Engineers. Rio de Janeiro, RJ.
- Rathore, J.S., E. Fjaer, R.M. Holt and L. Renlie**, 1994, P- and S-wave anisotropy of a synthetic sandstone with controlled crack geometry. *Geophysical Prospecting*, v. 43, p. 711-728.
- Soares, A.G., L.D. Dillon, G.F. Vasquez and A. Bastos**, 1996, Avaliação das direções principais de tensão *in situ* através da análise de anisotropia sísmica. Anais do 39º Congresso Brasileiro de Geologia. Salvador, BA.
- Teufel, L.W.**, 1983, Determination of *in situ* stress from anelastic strain recovery measurements of orientated core. Paper SPE 11649. 1983 SPE/DOE Symp. On Low Permeability Reservoirs, Denver, p. 14-16.
- Velloso, R.Q., G.F. Vasquez, and L.D. Dillon**, 2001, Determinação das direções principais de tensões *in situ* por anisotropia de velocidades. Anais do VII Congresso Internacional da SBGf. Salvador, BA.