



## Aplicação da Anisotropia Sísmica na Determinação das Direções das Tensões Principais: Ferramenta Geofísica para o Projeto de Poços

Ana Júlia P.P.M. Silveira (Fundação Gorceix), Márcio Morschbacher, Guilherme F. Vasquez, Julio C.R. Justen, Daniele R. Melo, Elisabete F. Campos (Petrobras).

Copyright 2011, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 12<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 15-18, 2011.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 12<sup>th</sup> 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

O método VelAn, acrônimo de “Velocity Anisotropy”, é uma ferramenta poderosa e relativamente barata para a determinação das direções de tensões principais *in situ*.

Neste trabalho apresentamos os fundamentos básicos desta técnica e alguns exemplos de sua aplicação em rochas carbonáticas. Os resultados dos ensaios ilustram notáveis sucessos do método bem como situações nas quais a técnica não fornece resultados conclusivos, discutindo-se assim as possíveis razões destes sucessos e insucessos.

A utilização do método VelAn mostrou-se bastante vantajosa por ser um método simples e rápido, no entanto a análise de imagens de tomografia das rochas foi essencial no mapeamento de heterogeneidades, as quais influem na eficácia do método.

### Introdução

A tecnologia “VelAn” utiliza a estimativa da anisotropia de velocidades sísmicas em testemunhos orientados para a estimativa das direções de tensões principais *in situ*. A hipótese fundamental para a aplicação desse método é de que uma rocha elástica, homogênea e isotrópica, sujeita à ação de diferentes tensões em subsuperfície, irá relaxar de forma não uniforme e não isotrópica quando tais tensões são aliviadas por ocasião da retirada da rocha para a superfície. As deformações oriundas desse processo que desenvolvem microfissuras são maiores na direção da maior tensão principal e menores na direção da menor tensão principal. Medidas de velocidades de propagação das ondas ultrassônicas em laboratório demonstram que a presença de microfissuras diminui significativamente a velocidade de ondas elásticas em rochas (Sayers, 1990).

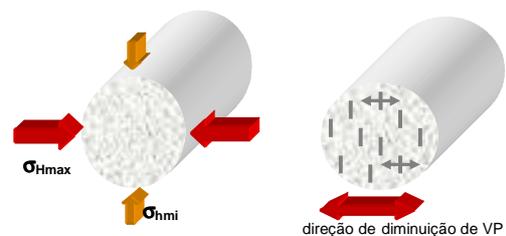
O método aplicado neste trabalho consiste na medida da velocidade de propagação de ondas em diversas direções radiais em amostras cilíndricas de rocha extraída de poços verticais. Neste caso, uma das tensões principais está orientada na vertical, sendo as medidas realizadas no plano horizontal para determinar as direções da tensão horizontal máxima.

Outro método que pode ser utilizado para este mesmo fim é o ASR (*Anelastic Strain Recovery*), o qual exige a instrumentação do testemunho na boca do poço, envolvendo assim custos operacionais bem mais elevados. Este método é bastante utilizado na mecânica de rochas e contribui para a validação dos resultados obtidos pelo VelAn que pode ser realizado a qualquer tempo após a testemunhagem (Bloch *et al.*, 2005).

Em conjunto com os resultados obtidos no VelAn, foram analisadas as imagens de tomografia computadorizada que contribuíram para a identificação da presença de heterogeneidades na densidade e/ou fraturas naturais que influenciam a velocidade da onda compressional, gerando o espalhamento das medidas.

### Metodologia

A Figura 1 representa uma amostra de rocha submetida a um campo de tensões horizontais anisotrópicas que sofre uma deformação radial anisotrópica quando é submetida à relaxação devido ao alívio das tensões com a testemunhagem.



a) antes da testemunhagem b) após a testemunhagem

Figura 1 – Desenvolvimento de fissuras internas causadas pelo alívio de tensões (Dillon *et al.*, 1995).

Este alívio de tensões provoca uma fissuração interna do testemunho preferencialmente orientada na direção perpendicular à direção da tensão horizontal máxima,  $\sigma_{Hmax}$ . Supondo a amostra homogênea, este alívio de tensões e conseqüente fissuramento causarão uma diminuição na velocidade da onda compressional original da rocha, sendo esse decréscimo maior na direção de  $\sigma_{Hmax}$ .

O aparato experimental vem sendo aprimorado pela equipe do Laboratório de Física de Rochas do Centro de Pesquisas da Petrobras. O conjunto utilizado para a

estimativa da velocidade da onda compressional em diferentes direções de propagação é composto por peças metálicas especiais (*caps*) que contêm os transdutores piezelétricos e que apresentam extremidades de contato que permitem a emissão e recepção do sinal num ponto específico do testemunho de rocha. Cada uma dessas peças metálicas é posicionada em direções diametralmente opostas na superfície lateral do testemunho de rocha (Figura 2).

No projeto inicial, essas extremidades possuíam formato pontiagudo posicionadas na superfície lateral da amostra de rocha e utilizava uma prensa de bancada para impor uma mesma tensão à amostra a cada posicionamento angular (Velloso *et al.*, 2001). O formato das extremidades foi adaptado ao *cap* na forma plana e a pressão aplicada através de acionadores pneumáticos, garantindo assim, um maior acoplamento no sistema (Morschbacher *et al.*, 2009). Essa pressão é de baixa magnitude e tem como único objetivo garantir o acoplamento acústico no contato dos *caps* com o testemunho de rocha. Outro artifício utilizado com o objetivo de melhorar o acoplamento acústico consiste em revestir a superfície dos *caps* em contato com a amostra com folhas de chumbo, e mantê-la lubrificada por meio de um fluido acoplante, nesse caso, silicone gel. Em alguns casos, amostras com superfície muito rugosa devem ser "torneadas" antes do ensaio para melhorar o acoplamento acústico do sistema. A Figura 2 ilustra a fotografia onde foram torneadas duas faixas cilíndricas ao longo da amostra de rocha.

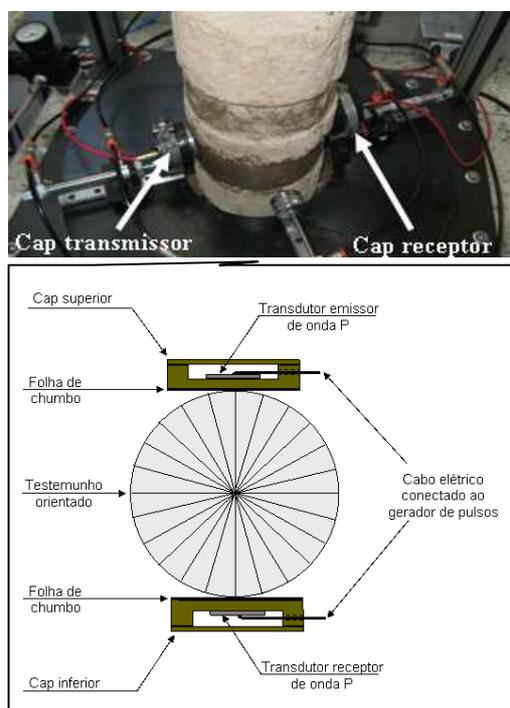


Figura 2 – Esquema de medição da velocidade de propagação de ondas acústicas em testemunhos de rocha.

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 converte esse sinal em vibração mecânica que, após percorrer o testemunho, chega ao transdutor receptor; quando então é novamente convertida em sinal elétrico que é analisado no osciloscópio. O testemunho é fixado numa base que permite rotação, de forma que diversas direções possam ser ensaiadas. As medidas de velocidade de propagação da onda compressional foram realizadas a cada 10 graus para cada amostra de rocha.

Durante o ensaio é determinado o tempo de trânsito  $\Delta t$  (intervalo de tempo) gasto pela onda compressional para percorrer o diâmetro  $\Delta x$  do testemunho em cada direção. A velocidade da onda compressional será dada por  $V_p = (\Delta x / \Delta t)$  em m/s. Pode-se ainda, expressar os resultados em termos da vagarosidade da onda compressional em cada direção, dada por  $V_{ag} = (1 / V_p)$  em s/m.

Dessa forma, a direção da tensão principal horizontal será aquela que apresentar máximo valor de vagarosidade da onda compressional, ou menor velocidade.

A análise tomográfica de Raios X é usada para verificar a integridade do testemunho e avaliar sua estrutura interna. Para uma análise qualitativa das imagens, as áreas coloridas de preto, representam regiões de baixa densidade, enquanto que as áreas com coloração branca representam regiões de alta densidade. Os tons intermediários presentes representam densidades também intermediárias.

## Resultados

Neste estudo particular foram comparados os resultados de ensaios realizados em quatro amostras de testemunhos orientados de rocha calcária, extraídos de dois poços de petróleo. Além do método VelAn aplicado, foram realizadas análises das imagens de tomografia computadorizada para a identificação da presença de heterogeneidades.

A Figura 3 apresenta os resultados da variação da velocidade e da vagarosidade com a direção da propagação da onda acústica para as amostras A e B, selecionadas do poço AB. A vagarosidade é apresentada na forma de gráfico de roseta colorida, sendo a direção mais alongada da roseta (i.e, de maior vagarosidade) paralela à direção da tensão principal horizontal *in situ*. As variações de velocidade e vagarosidade são relativamente bem comportadas, indicativo de que as amostras são homogêneas, fato comprovado através da análise de tomografia computadorizada (Figura 4). A anisotropia sísmica é da ordem de 5%. As duas amostras exibem um comportamento bastante similar, com a direção de maior vagarosidade, i.e, menor velocidade, entre 100° e 120°.

A Figura 4 apresenta fotografias e imagens de tomografia computadorizada de seções transversais das amostras nos intervalos analisados do poço AB. A alteração na coloração dos testemunhos, observada na forma de faixas cilíndricas, decorre da aplicação do silicone no contato do cabeçote de medidas com a superfície do

testemunho para melhorar o acoplamento. A análise tomográfica indica que, na região de interesse, as amostras são homogêneas.

As Figuras 5 e 6 se referem a um estudo similar realizado em duas amostras de testemunho selecionadas do poço CD, de um reservatório com fraturas naturais. Conforme indicado nas fotografias, em cada uma destas amostras foram realizados dois ensaios em posições distintas. Para acoplar melhor os cabeçotes de medidas, a superfície das mostras foi torneada em pequenas faixas, onde foram realizadas as medidas de VelAn.

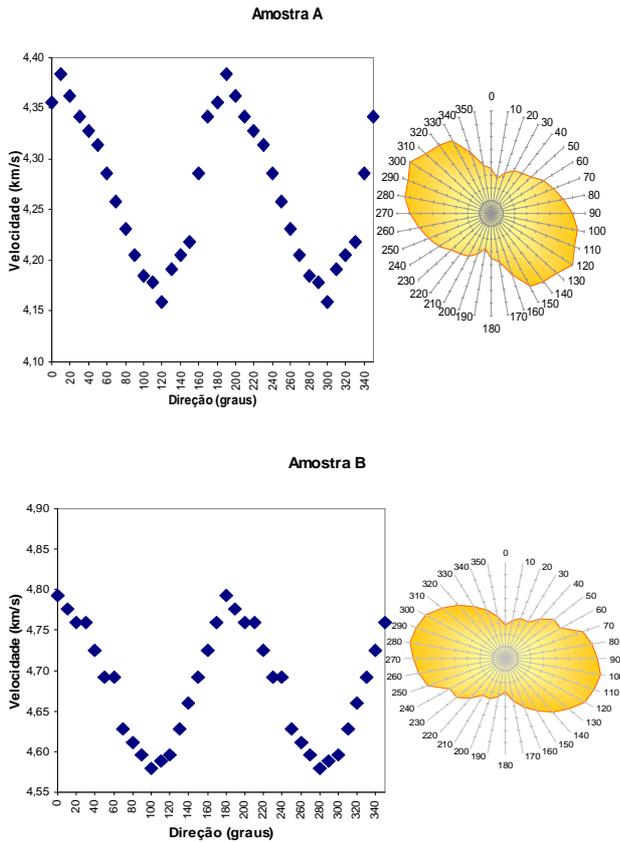


Figura 3 - Variação da velocidade (à esquerda) e da vagarosidade normalizada (rosetas à direita) com a direção de propagação das ondas compressoriais nas amostras A e B.

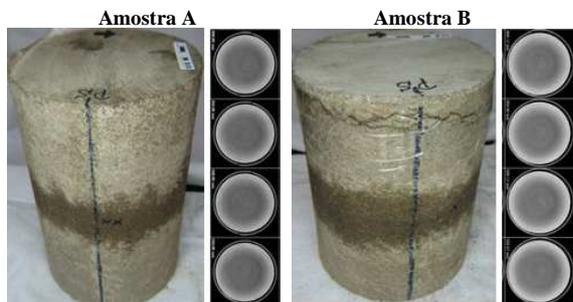


Figura 4 - Fotografias e imagens de tomografia das amostras A e B.

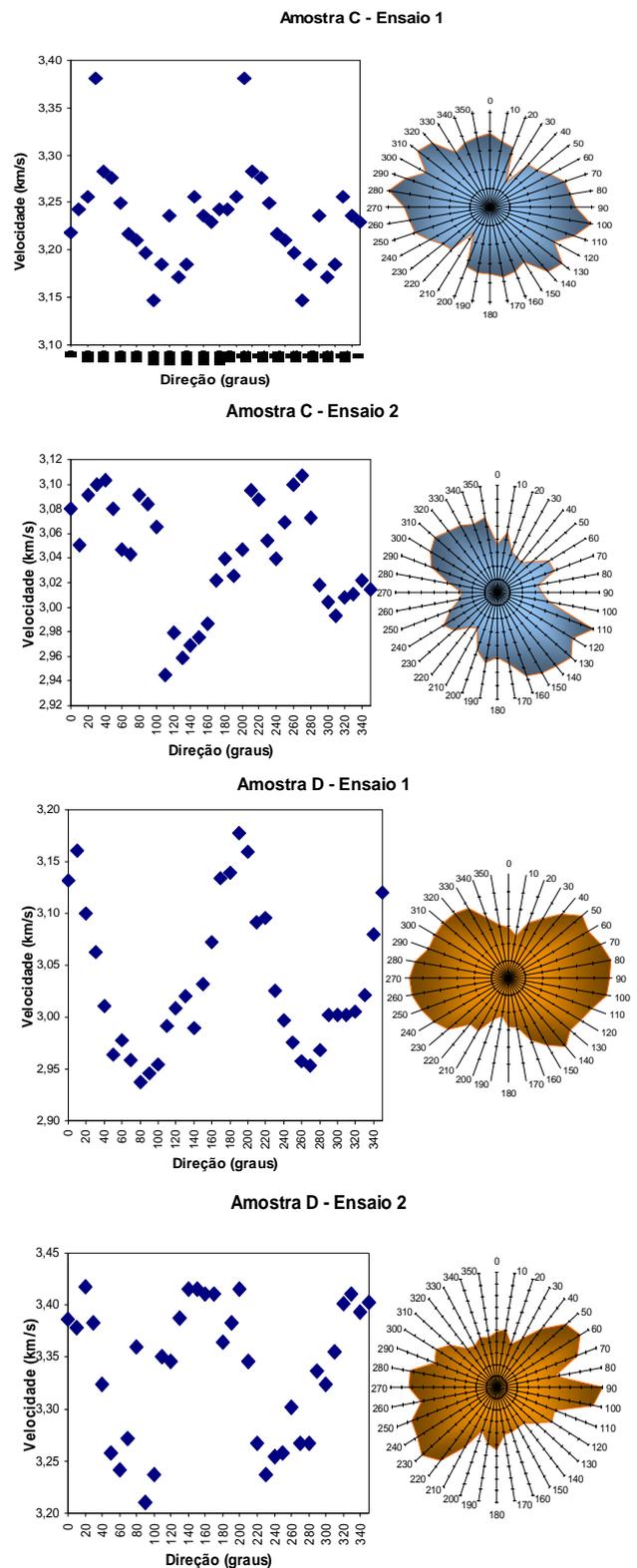


Figura 5 - Resultados da variação da velocidade (à esquerda) e da vagarosidade normalizada (rosetas à direita) com a direção da propagação da onda para o ensaio 1 e 2 nas amostra C e D.

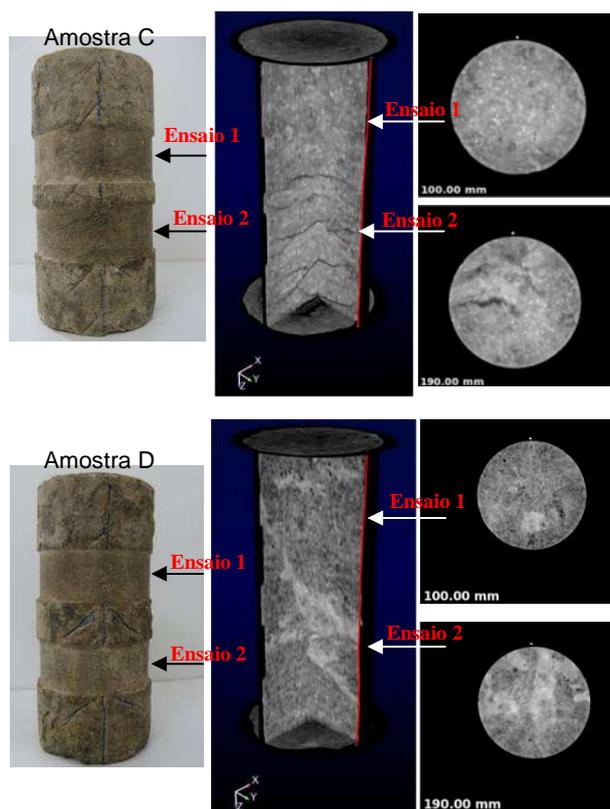


Figura 6 - Correlação das imagens tomográficas das amostras C e D.

As Figuras 5 e 6 apresentam os resultados da variação da velocidade e da vagarosidade (rosetas coloridas) com a direção da propagação da onda e a correlação das imagens tomográficas para as amostras C e D, respectivamente. Embora os resultados indiquem um significativo grau de anisotropia na velocidade sísmica com a direção de propagação das ondas, percebe-se que existe uma maior dispersão dos dados em comparação aos resultados obtidos nas amostras A e B (Figura 3). Analisando as imagens de tomografia de raios-X das amostras C e D (Figuras 5 e 6), percebe-se que na posição das análises de VelAn, há a ocorrência de fraturas de escala centimétrica e heterogeneidades na densidade, que podem ser as causas das dispersões encontradas nos resultados.

#### Discussões e Conclusões

Medidas de velocidade de propagação de ondas compressoriais foram realizadas em diversas direções radiais de amostras de testemunho de rocha carbonática com o objetivo de estimar, através da anisotropia de velocidades (VelAn), as direções principais das tensões horizontais *in situ*. É importante lembrar que o método VelAn assume que a rocha, antes da testemunhagem, é isotrópica e homogênea. A presença de heterogeneidades de densidade e/ou fraturas naturais afeta as velocidades sísmicas e pode prejudicar a interpretação do resultado do ensaio de VelAn. Em geral, a presença de heterogeneidades de baixa densidade

tende a aumentar a vagarosidade da rocha, enquanto que heterogeneidades de alta densidade tendem a reduzir o valor da vagarosidade.

Foi verificado que o par de amostras A e B, coletadas do poço AB, apresentaram resultados bastante concordantes entre si. Análises de tomografia mostraram que estas amostras são homogêneas, o que atende aos critérios da metodologia de VelAn. Ao contrário, as amostras C e D, coletadas do poço CD, apresentaram grande espalhamento das medidas de VelAn, possivelmente ocasionado pela presença de fraturas e uniformidades na densidade, identificadas nas análises de tomografia. Neste caso, as direções das tensões principais obtidas devem ser consideradas com cautela, mas ainda servem de parâmetro para as profundidades analisadas.

Neste trabalho, os resultados de tomografia foram de extrema importância, ilustrando que a presença de heterogeneidades na densidade e/ou fraturas naturais de grande escala (centímetros) afeta sobremaneira a medida da velocidade, sendo a associação dos dois métodos ideal para o alcance do melhor entendimento dos resultados. Vale ressaltar que os resultados aqui apresentados foram selecionados para ilustrar casos particulares, e que, em geral a técnica é eficiente e vem sendo aplicada com sucesso para a determinação das direções das tensões principais *in situ*.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem aos técnicos do Laboratório de Física de Rochas do CENPES e principalmente à PETROBRAS pela permissão da publicação deste trabalho.

#### Referências

- Bloch, M., Freitas, S. M. S., Socorro, M., Soares, J.A. e Bacelar, C.J.R. (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 American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Rio de Janeiro, RJ.
- Morschbacher, M., Justen, J.C.R, Vasquez, G. F, Leão, M., Alves, I. e Bacelar, C.J.R. (2009). "Orientação do Topo Estratigráfico de um testemunho Horizontal através da Análise de Anisotropia Sísmica". 11<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Salvador, BA.
- Sayers, C.M., 1990. Orientation of microcracks formed in rocks during strain relaxation. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.. Vol. 27, No. 5, pp. 437-439.
- Soares, A.G., Dillon, L.D., Vasquez, G.F. e Bastos, A.C. (1996). "Avaliação das direções principais de tensão *in situ* através da análise de anisotropia sísmica". Anais do 39<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Geologia, Salvador, BA.
- Velloso, R. Q., Vasquez, G. F. e Dillon L. D. (2001). "Estimativa das Direções Principais de Tensão *in Situ* por Anisotropia de Velocidades". VII Congresso Internacional da SBGf/PS1, Salvador, BA.