



# Viabilidade da Sísmica 4D em um Campo Terrestre Brasileiro: Enfoque de Rochas

Guilherme Vasquez, Guenther Neto, Lúcia Dillon e Fredrico Aguiar

PETROBRAS S.A.

## ABSTRACT

We made a feasibility study for the application of the time lapse seismic technique on a shallow onshore Brazilian field, at the Potiguar Basin, Rio Grande do Norte. This anonymous but real fluvial reservoir are now being subjected to vapor injection, which is a good production technique for seismic monitoring. Seismic velocities measurements on core samples and reservoir fluids, as well as fluid substitution on the available well log data, were used at the preliminary stage of the feasibility study in order to quantify the velocities and impedance changes that the reservoir would experience as a function of temperature, fluid saturation and pore pressure. Biot-Gassmann equations were combined with the reservoir thermal simulation in order to construct a velocity and impedance model for the seismic modeling. It was found that acoustic impedance changes as large as 40% would occur and that it should be resolved by the high resolution 3D seismic. The initial and final seismic models and it's updated versions shall help the reservoir geophysicists on the interpretation of the real time lapse seismic data, which may provide insights on the fluid flow behavior and reservoir heterogeneities.

## INTRODUÇÃO

Desde sua idealização, a sísmica com lapso de tempo ou sísmica 4D tem sido aplicada com sucesso no mapeamento da distribuição e fluxo de fluidos em reservatórios (Nur, 1989) e mesmo numa melhor caracterização e gerenciamento, em particular quando combinada com resultados fornecidos pela simulação de fluxo (Lumley and Behrens, 1997). Uma das etapas mais importantes desta tecnologia é a análise de viabilidade do monitoramento sísmico, que fornece as primeiras noções das variações em propriedades sísmicas a serem experimentadas pelo reservatório, podendo ser decisiva até no cancelamento de um projeto de monitoramento (Whiters and Batzle, 1997).

Neste trabalho apresentam-se resultados da análise de viabilidade do monitoramento sísmico do processo de injeção de vapor em um reservatório fluvial terrestre raso da Bacia Potiguar, Nordeste do Brasil. Devido à carência de dados de poços restringiu-se o estudo a dois poços representativos da área contendo uma suite de perfis adequada à aplicação da técnica de substituição de fluido e dispondo de amostras da rocha reservatório. Utilizaram-se os dados obtidos a partir da medida de velocidades de ondas compressoriais e cisalhantes em laboratório para o cálculo das propriedades sísmicas do reservatório sob diferentes condições, incluindo variações na temperatura, saturação e pressão de poros. Implementaram-se as fórmulas de Biot-Gassmann de forma a realizar-se a substituição de fluido nos modelos em volume fornecidos pela simulação térmica de fluxo, corroborando a análise inicial. As mudanças de impedância acústica podem chegar a valores da ordem de 40% e o modelamento sísmico indicou que a sísmica 3D de alta resolução tem capacidade de resolver as mudanças nas propriedades do reservatório. Atualmente o processamento do primeiro levantamento monitor está sendo concluído, espera-se que o volume de dados sísmicos sintéticos gerado sirva como base aos geofísicos de reservatório no mapeamento das distribuições de fluidos e também no refinamento do modelo inicial do reservatório.

## ANÁLISE DE DADOS DE LABORATÓRIO

Realizaram-se uma série de experimentos em laboratório para a determinação das velocidades sísmicas em amostras de rochas representativas do reservatório bem como em amostras do óleo original do campo. O comportamento da dependência das velocidades compressoriais e cisalhantes das amostras com a pressão, a seco, foi modelado segundo:

$$V = V_H \left( 1 - \frac{a}{1+a} \right) \exp \left( - \frac{P}{P_H} \right) \quad (1)$$

onde  $V$  é a velocidade (compressional ou cisalhante),  $V_H$  a velocidade para altos valores de pressão,  $P$  a pressão efetiva,  $P_H$  a pressão de estabilização da velocidade e  $a$  um parâmetro a ser determinado. Este comportamento é importante na previsão das propriedades do reservatório, uma vez que ocorrerão mudanças não somente na saturação de fluido, mas também na pressão de poros, sendo esta última muitas vezes mais importante (Wang et al, 1998). A combinação dos dados de velocidade compressional e cisalhante com resultados de análises petrofísicas permite a aplicação da técnica de substituição de fluido através das relações de Biot-Gassmann:

$$\mu_{SAT} = \mu_{SECA} \quad (2)$$

$$K_{SAT} = K_{SECA} + \frac{\left(1 - \frac{K_{SECA}}{K_{GRAO}}\right)^2}{\frac{\phi}{K_{FLUIDO}} + \frac{(1-\phi)}{K_{GRAO}} - \frac{K_{SECA}}{K_{GRAO}^2}} \quad (3)$$

$$\rho_{SAT} = (1-\phi)\rho_{GRAO} + \phi\rho_{FLUIDO} \quad (4)$$

onde  $\mu$  é o módulo de cisalhamento,  $K$  o módulo *bulk* ou módulo de incompressibilidade,  $\rho$  a densidade e  $\phi$  a porosidade da rocha, os subíndices SAT e SECA referem-se à rocha saturada e seca, GRAO à parte sólida (matriz) e FLUIDO ao fluido saturante. Os módulos elásticos da rocha seca foram calculados para cada valor de pressão efetiva a partir da medida das velocidades em laboratório segundo:

$$\mu_{SECA} = \rho_{SECA} V_{S,SECA}^2 \quad (5)$$

$$K_{SECA} = \rho_{SECA} \left( V_{P,SECA}^2 - \frac{4}{3} V_{S,SECA}^2 \right) \quad (6)$$

os dados de fluido foram utilizados para diferentes condições de saturação, temperatura e pressão sugeridas pelos engenheiros de reservatório, conforme a Tabela I, na qual "Mix" refere-se à mistura Óleo+Água *in situ*, sendo o óleo de

Tabela I – Propriedades do fluido saturante utilizadas para cálculo do comportamento sísmico sob diferentes condições.

Fluido	T=37,6°C P=2,08MPa RGO=5		T=37,6°C, P=0,97MPa, RGO=1,99		T=100°C, P=0,97MPa, RGO=1,5		T=175°C, P=0,97MPa RGO=1,09		T=37,6°C P=4,40MPa RGO=1,99		T=100°C P=4,40MPa RGO=1,5		T=175°C, P=4,40MPa, RGO=1,09	
	K (GPa)	$\rho$ (g/cc)	K (GPa)	$\rho$ (g/cc)	K (GPa)	$\rho$ (g/cc)	K (GPa)	$\rho$ (g/cc)	K (GPa)	$\rho$ (g/cc)	K (GPa)	$\rho$ (g/cc)	K (GPa)	$\rho$ (g/cc)
Óleo	1,929	0,938	1,948	0,941	1,157	0,888	0,513	0,826	1,995	0,941	1,172	0,884	0,580	0,830
Água	2,326	0,994	2,320	0,993	2,285	0,962	1,723	0,896	2,339	0,995	2,315	0,963	1,814	0,903
Mix	2,050	0,957	2,062	0,959	1,395	0,913	0,677	0,850	2,102	0,959	1,412	0,912	0,757	0,855

16,5°API e a salmoura de salinidade 900ppm. A Figura 1 ilustra os resultados para a velocidade compressional de uma amostra típica.

Mediram-se as velocidades acústicas do óleo original do campo a diferentes pressões e temperaturas, observando-se que os valores medidos encontram-se em excelente concordância com aqueles previstos por Batzle e Wang (1997). É interessante notar, conforme ilustrado na Figura 2, que o comportamento da velocidade da rocha com a temperatura obedece aproximadamente o mesmo gradiente que a própria velocidade do óleo, a despeito de efeitos de dispersão. As medidas de velocidades de rocha saturada com óleo do campo em laboratório foram confrontadas com a previsão de

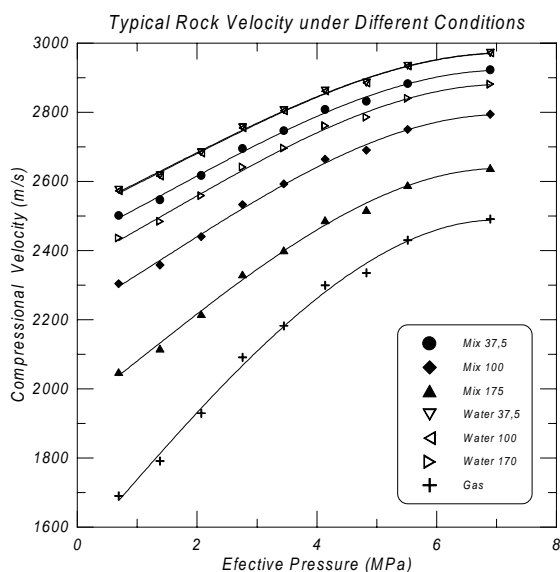


Figura 1 – Velocidade compressional para uma amostra sob diferentes condições .

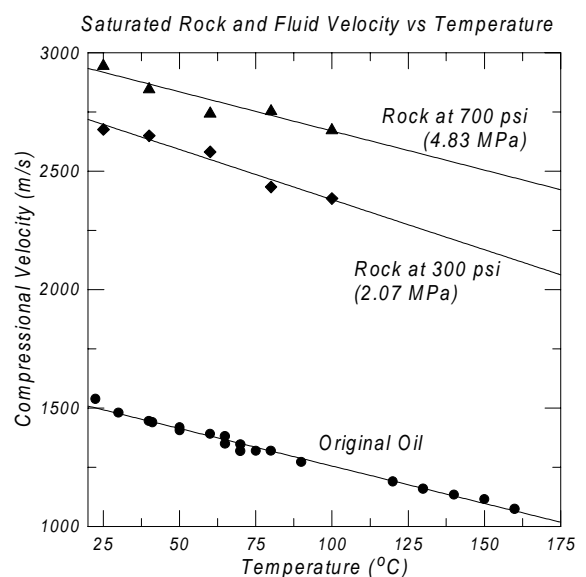


Figura 2 – Velocidade compressional de uma amostra saturada e do óleo original em função da temperatura.

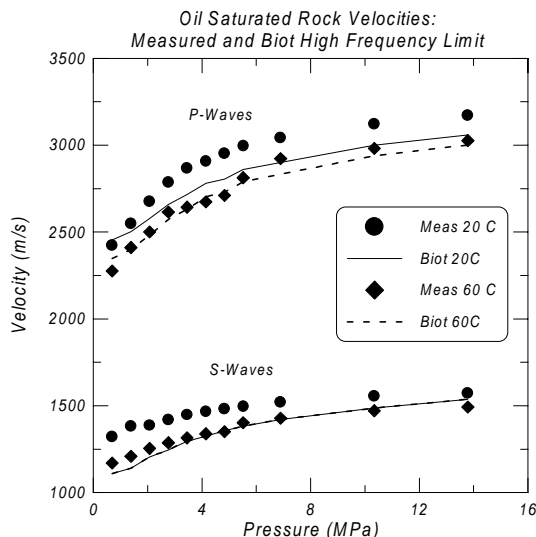


Figura 3 – Velocidades compressional e cisalhante de uma amostra saturada com óleo original do campo a diferentes temperaturas comparada à previsão de Biot.

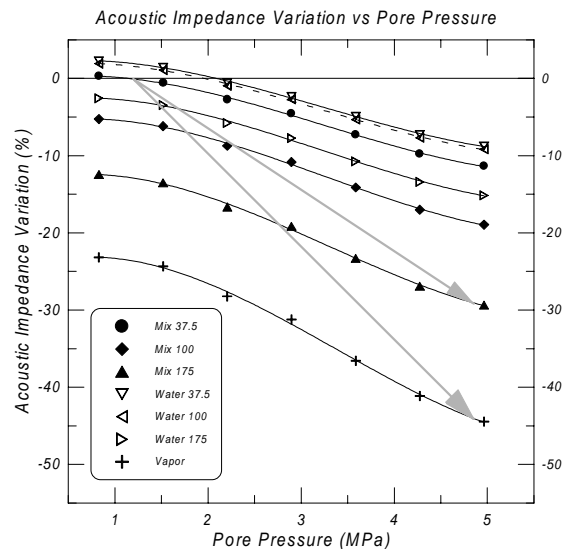


Figura 4 – Variações na impedância acústica calculadas para uma amostra típica sob diferentes condições de saturação e temperatura. As setas ilustram duas situações prováveis.

Biot (para o limite de altas frequências), na Figura 3 tem-se as medidas e previsões de Biot para as temperaturas de 20°C e 60°C. Nota-se que a velocidade medida à temperatura de 20°C é da ordem de até 10% maior da prevista por Biot, devido a efeitos de dispersão relacionados ao fluxo localizado de fluido na escala dos poros. Tais efeitos, no entanto, não são notados a 60°C e são pequenos nas condições de reservatório (não mostrado na Figura).

Calcularam-se os valores de variações percentuais das propriedades sísmicas mais relevantes, como velocidades, impedâncias e razão de Poisson, para as diferentes condições ilustradas na Tabela I. A Figura 4 ilustra as variações em impedância acústica para uma amostra sob diferentes condições de saturação em função da pressão. Nota-se que a mudança na pressão de poros tem um forte impacto nas variações das propriedades sísmicas do reservatório, conforme já salientado.

As variações previstas nesta fase sugerem que o monitoramento sísmico é altamente recomendável. Observaram-se ainda variações de até 70% na razão de Poisson, sugerindo a utilização da técnica de AVO no auxílio ao mapeamento da distribuição de fluidos.

#### ANÁLISE DE DADOS DE PERFIS

Os perfis de ondas elásticas foram invertidos pela técnica de substituição de fluido partindo-se dos registros de ondas compressional e cisalhantes, porosidade e densidade e supondo-se a matriz como composta de quartzo. A utilização da técnica de inversão baseada em Biot-Gassmann justifica-se pela alta permporosidade do reservatório e a baixa dispersão observada mesmo a frequências ultra-sônicas. Devido à falta do perfil de saturação de água  $S_w$ , cujo cálculo na área é dificultado pela baixa salinidade da salmoura, admitiu-se uma saturação uniforme de 34,7% de água. Esta aproximação é razoável uma vez que limitamo-nos ao intervalo do reservatório.

A partir dos registros originais geraram-se registros sintéticos referentes à rocha seca que, por sua vez, serviram de entrada para cálculo dos perfis sob diferentes condições de saturação, temperatura e pressão de poros.

Estes resultados mostram variações médias para a impedância acústica de de 20 a 25%, considerando-se apenas o efeito da temperatura, com a saturação e pressão mantidas constantes. Incluindo-se o efeito adicional de aumento da pressão de poros as variações são ainda mais acentuadas. No caso da saturação original, aumentando-se a temperatura e a pressão de poros, a impedância sofre um decréscimo da ordem de 26%, e considerando-se ainda a mudança de saturação para o vapor, atinge-se 45% de variação na impedância acústica.

Na Figura 5 ilustram-se os perfis de ondas compressional de um poço da área para a condição inicial e para a condição de aumento de pressão de poros (que pode chegar a 3,4MPa ou 500 psi) com o fluido original e com vapor. Observa-se que neste caso apenas o aumento da temperatura e

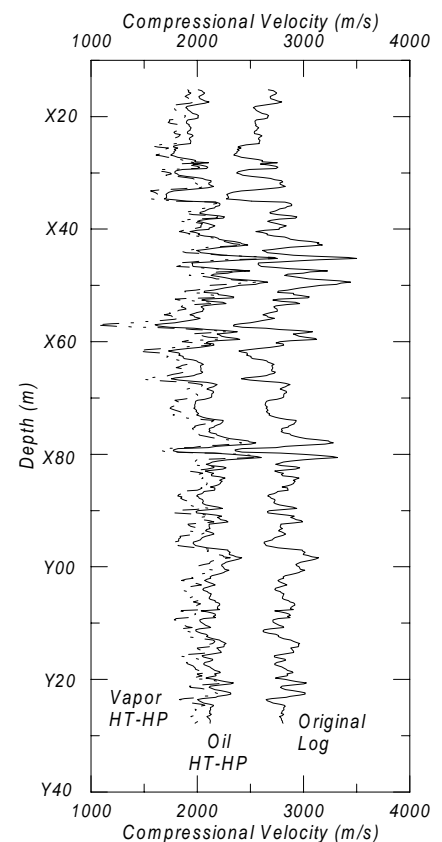


Figura 5 – Perfil de ondas compressional para um dos poços utilizados mostrando o dado original e os resultados esperados para óleo e vapor a altas pressões.

pressão de poros, sem substituição do fluido saturante, já é suficiente para causar reduções significativas na velocidade acústica.

Na Figura 6 tem-se os perfis de variações percentuais na impedância acústica para a saturação com o fluido original e com vapor para as temperaturas original e 175°C, incluindo-se também o aumento da pressão de poros. Novamente, percebe-se que o aumento da pressão de poros é um fator muito importante para a variação das propriedades do reservatório. O óleo aquecido e sob alta pressão leva a variações da ordem de 27% na impedância, e o vapor a variações da ordem de 40%. Mesmo o óleo à temperatura original sobrepresurizado acarretaria uma variação da ordem de 15% na impedância.

### SIMULAÇÃO

Escreveu-se um programa para, a partir da saída do simulador de fluxo, aplicar as equações de Biot-Gassmann baseando-se nos dados de pressão, saturações e temperatura fornecidos pelo simulador. A modelagem sísmica sobre o volume de velocidades e impedâncias assim gerado mostra que as mudanças sofridas pelo reservatório podem ser monitoradas pelo método sísmico.

### CONCLUSÕES

A análise de viabilidade utilizando-se resultados de medidas de velocidades em laboratório, dados de perfis, substituição de fluido e simulação de fluxo combinada à modelagem sísmica mostrou que no caso deste reservatório o monitoramento é altamente indicado. Atualmente o processamento do primeiro levantamento monitor está em vias de conclusão. Os resultados deste estudo servirão de base para a interpretação dos dados com lapso de tempo, levando a uma melhor compreensão do fluxo de fluidos em subsuperfície.

### REFERÊNCIAS

- Batzle M. L. and Wang, Z., 1992. *Seismic properties of pore fluids: GEOPHYSICS*, 57 (11), 1396-1408.
- Zhijing Wang, Z., Cates, M. E., and Langan, R. T., 1998. *Seismic monitoring of a CO2 flood in a carbonate reservoir: a rock physics study: GEOPHYSICS*, 63 (5), 1604-1617.
- Withers, R. J. and Bazle, M. L., 1997. *Modeling velocity changes associated with a miscible flood in the Prudhoe Bay Field: GEOPHYSICS*, 62 (5), 1442-1455.
- Nur, A., 1989. *Four dimensional seismology and (true) direct detection of hydrocarbons: the petrophysical basis: The Leading Edge*, 9, 30-36.
- Lumley, D. E. and Behrens, R. A., 1997. *Practical engineering issues of 4D seismic reservoir monitoring: 1997 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, 5-8 October, 1997 (SPE 38696)*.

### AGRADECIMENTOS

Agradecemos à PETROBRAS pela oportunidade de realização e publicação deste trabalho, aos colegas do Centro de Pesquisas da PETROBRAS, em particular José Eduardo Lira, Albano Bastos, Lincoln Homero, Marcos Leão e José Agnelo, pelo auxílio ao desenvolvimento deste trabalho. Agradecemos ainda a Michael Batzle por discussões interessantes e esclarecedoras.

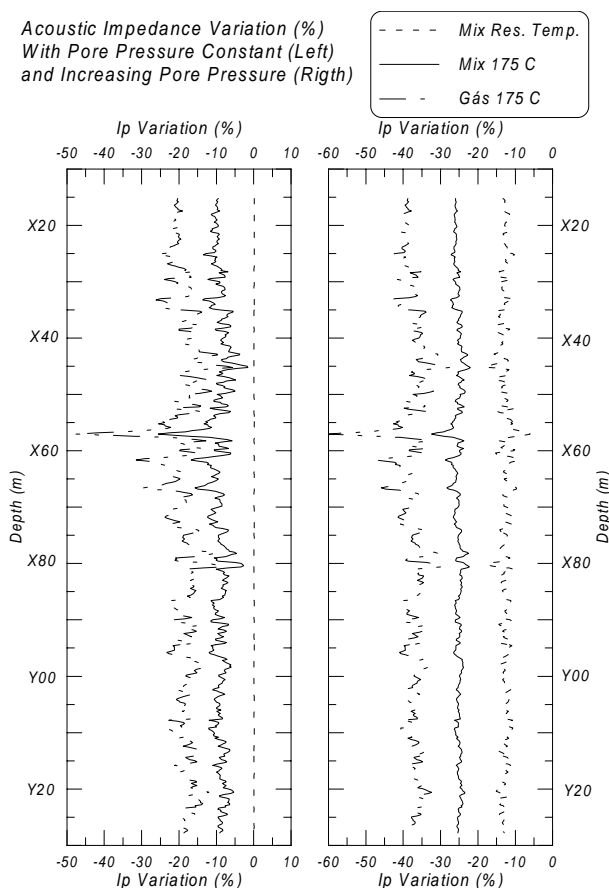


Figura 6 – Perfis de variações na impedância acústica para a saturação com óleo original e vapor às temperaturas original e 175°C. O perfil da esquerda não considera o aumento da pressão de poros, que é contemplado no perfil da direita.