

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

INFLUÊNCIA DA MATÉRIA ORGÂNICA SOB DIFERENTES ESTÁGIOS DE MATURAÇÃO TÉRMICA SOBRE AS VELOCIDADES SÍSMICAS DOS FOLHELHOS DA FORMAÇÃO IRATI

Margareth da Silva Brasil Guimarães¹, José Agnelo Soares², João Graciano Mendonça Filho³

¹ Departamento de Geologia, IGEO, CCMN, UFRJ, megbrasil@yahoo.com.br

² Departamento de Geologia, IGEO, CCMN, UFRJ, agnelo@geologia.ufrj.br.

³ Departamento de Geologia, IGEO, CCMN, UFRJ, graciano@geologia.ufrj.br

Resumo – Os folhelhos constituem um elemento de ocorrência constante nas bacias sedimentares produtoras de hidrocarbonetos, no entanto são ainda um tipo litológico pouco estudado acerca das relações entre as velocidades sísmicas e as composições mineral e orgânica. O objetivo deste trabalho é entender a influência da composição orgânica e do grau de maturação térmica dos folhelhos nas velocidades das ondas P e S. Para tal, foram estudadas 19 amostras de folhelhos da Formação Irati, termalmente afetadas por intrusões ígneas. As amostras foram coletadas em diferentes distâncias em relação a rocha intrusiva, de modo a apresentarem maturações térmicas distintas. As velocidades foram medidas em plugues confeccionados nas direções paralela e perpendicular ao acamamento e, simultaneamente, foram determinados os tipos de querogênio e o grau de maturação térmica utilizando o poder refletor da vitrinite. Os resultados apontam para uma forte influência do conteúdo orgânico nas velocidades. As análises revelam que as menores velocidades estão relacionadas às amostras que apresentam os maiores valores de COT e predomínio do querogênio tipo I (matéria orgânica amorfa). No entanto, não é possível quantificar a influência direta do grau de maturação térmica dos folhelhos, uma vez que amostras no mesmo estágio de maturação apresentam valores discrepantes de velocidades.

Palavras-Chave: velocidades sísmicas; petrografia orgânica; maturação térmica

Abstract – Shales are constantly referred in literature as an element for hydrocarbon production in sedimentary basins; however they are very few studied in terms of the relationships between the seismic velocities and mineral and organic composition. The main objective of this work is to understand the influence of the organic composition and thermal maturity of shales in its seismic velocities. To achieve this, 19 shales samples from the Irati Formation (Paraná basin) were collected, which was thermally affected by igneous intrusions. These samples were collected in different distances from igneous intrusions in order to have different thermal maturity levels. Elastic velocity measurements were made in directions parallel and perpendicular to the bedding, while the shale samples were characterized in terms of kerogen type and thermal maturity through vitrinite reflectance measurements. The results show a strong relationship between the organic content and seismic velocities. Lower velocities were found in samples with higher COT and type I kerogen. However, conclusions can not be made about the influence of the thermal maturity since samples with the same maturity level have shown very different velocities.

Keywords: seismic velocities, organic petrography, thermal maturity

1. Introdução

Os folhelhos constituem um tipo litológico pouco estudado no que tange às propriedades físicas que afetam as velocidades sísmicas. Estudos experimentais detalhados dos efeitos do conteúdo de querogênio e da maturidade térmica das rochas geradoras nas velocidades sísmicas são raros, especialmente no caso dos folhelhos presentes nas bacias sedimentares brasileiras. No entanto, alguns autores (Helbig, 1993; Vernik e Landis, 1996; Vernik e Liu, 1997; Guimarães, 2004) apontam para uma forte evidência da influência do conteúdo de argila e do querogênio na anisotropia de velocidade de folhelhos. O estudo da distribuição do conteúdo orgânico e do seu grau de maturação é essencial para a correta interpretação de dados de sísmica de reflexão, uma vez que os folhelhos ricos em matéria orgânica imprimem uma forte anisotropia *in situ*. Vernik e Nur (1992), comparando folhelhos geradores e não geradores, revelaram que os últimos apresentavam maiores valores de velocidade da onda compressional (V_p), dando suporte a idéia de que o conteúdo de querogênio presente nos folhelhos geradores provocava um efeito considerável nas velocidades das ondas sísmicas. Desta forma, este trabalho tem como objetivo entender as relações entre as velocidades sísmicas e a composição orgânica de diversos folhelhos da Formação Irati sob diferentes estágios de maturação térmica, através da identificação do conteúdo orgânico e de seu grau de maturação, medido através do poder refletor da vitrinite (%Ro), e da medição das velocidades sísmicas em escala de laboratório.

2. Amostragem dos Folhelhos da Formação Irati

Foram coletadas 19 amostras de folhelhos da Formação Irati em diferentes estágios de maturação térmica, conforme a sua proximidade com as intrusivas ígneas que ocorrem na bacia do Paraná (Tabela 1). Optou-se por estudar os folhelhos da Formação Irati por apresentar os três estágios de maturidade térmica ao longo da bacia do Paraná e pelo seu potencial como rocha geradora de hidrocarbonetos. No entanto, em função da espessura das soleiras de diabásio (aproximadamente 60 metros), não foi possível coletar amostras desde o contato até o término da influência térmica da intrusão. Não obstante, as amostras foram coletadas em diferentes distâncias em relação à intrusiva ígnea, o que indica uma diferença de maturação térmica entre elas. Para as amostras coletadas foram confeccionados plugues cilíndricos nas direções perpendicular (vertical) e paralela (horizontal) ao acamamento para grande parte das amostras, que foram submetidos aos ensaios de monitoramento acústico.

Tabela 1. Descrição dos pontos amostrados na etapa de campo

Amostras	Observações
I-1	Contato do Irati com o diabásio. Amostra retirada abaixo do contato do Irati com a soleira de diabásio.
I-2	Contato do Irati com o diabásio. Amostra retirada abaixo do contato do Irati com a soleira de diabásio.
II-1 (A, B, C)	Contato do Irati com o diabásio. Amostra retirada no contato acima da soleira de diabásio de aproximadamente 70 m.
II-2	Contato do Irati com o diabásio. Amostra retirada no contato acima da soleira de diabásio de aproximadamente 70 m. Coletada num nível mais abaixo que II-1.
II-3 (A, C)	Contato do Irati com o diabásio. Amostra retirada no contato acima da soleira de diabásio de aproximadamente 70 m. Coletada num nível mais abaixo que II-2.
III-1 (A, B, D, E)	Intercalação de calcário e folhelho da formação Irati. Esta pedreira não está em contato com a intrusão ígnea.
VI-1 (D, E, F)	Sill passando acima do afloramento.
VII-1A	Amostra retirada aproximadamente 3 metros abaixo do sill de 5 m.
VII-1B	Bloco solto retirado na saibreira póxima ao ponto VI-1A.
SM-1 SM-2	Formação Irati não está em contato com a intrusiva.

3. Ensaio de Monitoramento Acústico

Os ensaios foram realizados em uma câmara de medição de velocidades nas pressões de 34,5 MPa, 27,6 MPa, 20,7 MPa, 13,8 MPa e 6,9 MPa. O ensaio consiste, inicialmente, na determinação do tempo em que a onda viaja sem a

presença do plugue, determinando assim o tempo de sistema utilizado no cálculo das velocidades. Após esta etapa, são medidos os tempos relativos às chegadas das ondas P e S para cada plugue de amostra. O tempo medido no ensaio corresponde ao tempo de sistema somado ao tempo de propagação das ondas P e S na amostra. Foram também determinados os comprimentos do plugues e, em seguida, foram calculadas as velocidades V_P e V_S através das equações:

$$V_P = \frac{L}{(T_P - TS_P)} \quad (1)$$

$$V_S = \frac{L}{(T_S - TS_S)} \quad (2)$$

onde,

L = Comprimento do plugue;

T_P = Tempo medido de chegada da onda P;

T_S = Tempo medido de chegada da onda S;

TS_P = Tempo de sistema da onda P; e

TS_S = Tempo de sistema da onda S.

4. Petrografia e Geoquímica Orgânica

A etapa de petrografia orgânica consistiu na qualificação e na quantificação da matéria orgânica presente nas amostras estudadas assim como na determinação do seu estado de maturação térmica. Para tal, foram confeccionadas lâminas organopalinológicas e plugues de concentrado de querogênio que foram analisados em microscopia de luz branca transmitida, fluorescência e luz branca refletida.

A análise petrográfica foi feita através de lâminas organopalinológicas utilizando uma simplificação das classificações propostas por Burgess (1974 *apud* Tyson, 1995), Stach et al. (1975 *apud* Tyson, 1995), Combaz (1980 *apud* Tyson, 1995) e Tyson (1995) em que o querogênio é dividido em três principais grupos: matéria orgânica lenhosa, matéria orgânica liptinitica e matéria orgânica amorfa. A identificação do conteúdo orgânico permitiu classificar o querogênio nos tipos I, II e III. O querogênio do tipo I compreende a matéria orgânica algal lacustre e a matéria orgânica enriquecida em lipídios pela atividade bacteriana (amorfa). O querogênio do tipo II compreende a matéria orgânica marinha depositada em ambientes redutores (liptinitica) e o tipo III se refere a matéria orgânica lenhosa de vegetais terrestres superiores (Tissot e Welte, 1978).

O grau de maturação térmica foi determinado em plugues de concentrado de querogênio estimando o poder refletor da vitrinite (%Ro). Nesta técnica são atribuídos valores numéricos às medidas fotométricas de reflectância da vitrinite. Para rochas no estágio de diagênese (imaturas), o %Ro é menor que 0,5, alcançando valores de 0,5 a 2,0 na catagênese (maturas) e entre 2,0 e 4,0 para rochas no estágio de metagênese (supermaturas). Tissot e Welte (1978) ainda diferenciam o %Ro para as rochas maduras, assumindo valores entre 0,5 e 1,3 para as rochas que estão na janela de geração de petróleo e 1,3 a 2,0 na geração de gás e condensados.

Foram também determinados os valores de Carbono Orgânico Total (COT) para estimar a quantidade de matéria orgânica presente nas amostras, a partir da análise combinada do tipo de querogênio, identificado nas lâminas organopalinológicas, e do grau de maturação térmica indicados pelo %Ro. Esta estimativa é feita multiplicando-se o COT por um fator de conversão (Tabela 2) que depende do tipo de querogênio e do grau de maturação térmica (Tissot e Welte, 1978).

Tabela 2. Fatores de conversão para determinação do teor de matéria orgânica a partir do COT (Tissot e Welte, 1978).

Grau de Maturação	Tipo de querogênio		
	I	II	III
Imaturas	1,25	1,34	1,48
Maturas	1,20	1,19	1,18

5. Resultados e Discussões

A análise das lâminas organopalinológicas indica a ausência de matéria orgânica nas amostras coletadas no contato entre a Formação Irati e as intrusões ígneas (I-1, I-2, II-1A, II-1B, II-1C, II-3A e II-3C). Estas amostras, por

estarem exatamente no contato com a soleira de diabásio, sofreram forte influência térmica proveniente das intrusões, atingindo um estágio de metamorfismo de baixo grau, indicado pela presença de minerais metamórficos (lizardita, biotita, clorita), em que toda a matéria orgânica outrora presente foi destruída. As amostras, em geral, apresentaram um predomínio de matéria orgânica amorfa em relação ao material lenhoso e a matéria orgânica liptinitica.

As amostras SM-1 e SM-2 apresentam valores médios de %Ro em torno de 0,289% e 0,329%, respectivamente. Estes resultados indicam que as rochas do ponto SM não foram afetadas termicamente pela intrusão ígnea, estando ainda no estágio de diagênese (ou imaturas).

As amostras III-1A e III-1D apresentam valores de %Ro de 1,643% e 1,422%. Nesta amostra somente foi possível realizar a medida para uma única vitrinita, dada a escassez deste maceral. De acordo com a classificação de Tissot & Welte (1978), estas amostras recaem na condição de catagênese na faixa de geração de gás e condensados, o que indica que estas amostras foram termicamente alteradas por influência local das intrusivas ígneas.

As amostras VI-D e VII-1B apresentam valores médios de %Ro de 2,092% e de 2,329%, respectivamente, indicando que estas amostras já entraram no estágio de metagênese (Tissot & Welte, 1978), atingindo temperaturas muito elevadas em função da proximidade da entrada com os corpos ígneos.

Os resultados da composição orgânica, COT e grau de maturação térmica das amostras que contém matéria orgânica são observados na Tabela 3.

Tabela 3. Composição orgânica, grau de maturação e COT das amostras estudadas.

Amostra	COT	%RO	Lenhosa (%)	Liptinitica (%)	Amorfa (%)
III-1A	1,19	1,643	50	10	40
III-1B	1,36	1,2-1,3	5	5	90
III-1D	1,22	1,422	5	5	90
III-1E	1,24	1,30-1,40	5	5	90
VI-D	10,9	2,092	5	5	90
VI-E	12,5	2,4	5	5	90
VI-F	13,3	2,5	5	5	90
VII-1A	0,207	2,4	70	10	20
VII-1B	0,276	2,329	70	20	10
SM-1	13,6	0,289	5	10	85
SM-2	3,38	0,329	5	20	75

As velocidades das ondas sísmicas medidas em alta frequência (cerca de 200KHz) foram realizadas nos plugues confeccionados nas duas direções de propagação. Para as amostras II-3A, III- 1(B, D, E), VI-1F e VII- 1B não foram medidas as velocidades na direção paralela ao acamamento uma vez que não foi possível confeccionar plugues nesta direção (Tabela 4).

Tabela 4. Velocidades das ondas P e S obtidas para as amostras horizontal e vertical, à pressão de 34,5MPa.

Amostra	V_P horizontal (m/s)	V_S horizontal (m/s)	V_P vertical (m/s)	V_S vertical (m/s)
I-1	5757	3805	5722	3494
I-2	5699	2608	5417	2441
II-1A	5497	3606	4938	2606
II-1B	6081	3786	5428	2942
II-1C	5977	3749	5528	3430
II-2	5706	3458	5395	3410
II-3A	-	-	3867	1772
II-3C	4802	2873	3750	2179
III-1A	3907	2086	3464	1708
III-1B	-	-	3550	2033
III-1D	-	-	3418	1929
III-1E	-	-	3659	1721
VI-1D	3019	1547	2265	1462
VI-1E	3009	1671	2482	1515
VI-1F	-	-	2564	1367
VII-1A	4743	3047	4045	2627
VII-1B	-	-	4460	2566
SM-1	3420	1948	2974	1613
SM-2	3621	2150	2853	1557

Os resultados obtidos nos ensaios de medição de velocidades indicam que tanto para os plugues retirados paralelamente quanto perpendicularmente ao acamamento, as ondas P e S apresentam velocidades mais altas para as amostras que não contêm matéria orgânica (I-1 e II-1B), totalmente destruída durante o metamorfismo de contato, e velocidades mais baixas nas amostras com COT muito elevados (VI-D, VI-E, VI-F e SM-1).

As amostras nos pontos I e II tendem a apresentar valores mais elevados de velocidades P e S tanto na direção horizontal quanto na vertical, discrepantes daqueles padronizados na literatura, em função do aumento dos módulos de incompressibilidade e de cisalhamento ocasionado pelo metamorfismo.

Nas amostras com conteúdo orgânico não é observada uma variação das velocidades sísmicas em função do grau de maturação da matéria orgânica, sendo somente influenciada pela riqueza e pelo tipo de conteúdo orgânico. As amostras do ponto VII, que apresentam os maiores valores de velocidades, são as menos ricas em carbono orgânico e as únicas com baixos teores de matéria orgânica amorfa (10% e 20%). Comparativamente, apresentam velocidades próximas daquelas obtidas nas amostras com ausência de matéria orgânica, indicando uma forte correlação entre as velocidades sísmicas e o conteúdo de querogênio. As amostras VI-D, VI-E, VI-F e SM-1, que apresentam as menores velocidades, apresentam os mais altos valores de COT e predomínio de matéria orgânica amorfa (média de 90%), corroborando a hipótese de que maiores teores de carbono orgânico imprimem nas rochas valores mais baixos de velocidades. Vernik & Nur (1992) atribuem uma relação entre o estágio de geração e migração de hidrocarbonetos e as variações das velocidades em função do aumento da pressão confinante. No entanto, esta correlação não é observada nos folhelhos estudados. As amostras dos pontos VI e VII apresentam, respectivamente, as maiores e as menores variações para a velocidade da onda P na direção perpendicular ao acamamento (Figura 1), no entanto, o grau de maturação térmica para estas amostras é bastante similar. Este fato, considerado isoladamente, desautoriza qualquer quantificação do efeito do grau de maturação sobre as velocidades das ondas P e S.

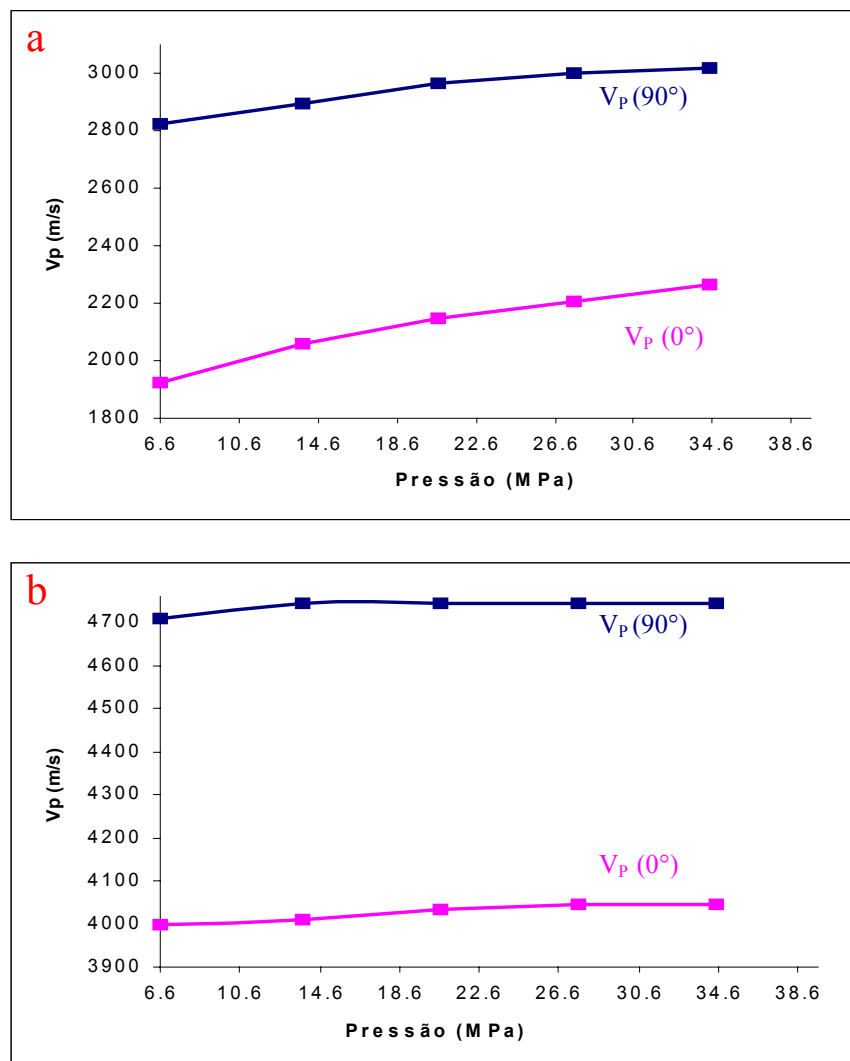


Figura 1. Variação das ondas compressoriais perpendiculares $V_p(0^\circ)$ e paralelas (90°) em função da pressão confinante. (a) VI-D e (b) VII-1A.

6. Conclusões

As velocidades sísmicas refletem as variações no conteúdo orgânico e no grau de compactação das rochas. As amostras mais compactadas pelo metamorfismo de contato, desprovidas de matéria orgânica, destruída pelo alto gradiente termal, tendem a apresentar valores de velocidades mais elevados para as ondas P e S em função do aumento dos módulos elásticos da rocha. Por outro lado, os folhelhos que possuem altos teores de material orgânico, especialmente matéria orgânica amorfa, apresentam velocidades mais baixas. Em outras palavras um componente importante no controle das velocidades elásticas de folhelhos geradores é o seu conteúdo de matéria orgânica. Amostras com teores mais elevados de matéria orgânica tendem a apresentar velocidades elásticas mais baixas.

Não é observada uma influência do grau de maturação térmica nas velocidades sísmicas dos folhelhos da Formação Irati, uma vez que as amostras que apresentam as maiores e as menores velocidades se encontram num mesmo estágio de maturação térmica.

7. Agradecimentos

Os autores agradecem ao projeto CTPETRO “Análise Petrofísica Integrada de Folhelhos”, financiado pelo convênio PETROBRAS/FINEP, e em especial ao professor Carlos Jorge de Abreu do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Adicionalmente, os autores agradecem ao Laboratório de Física de Rochas e ao Laboratório de Petrografia Orgânica do Centro de Excelência em Geoquímica, ambos do Centro de Pesquisas da PETROBRAS.

8. Referências

- GUIMARÃES, M. S. B. *Análise Integrada de Propriedades Petrofísicas, Petrográficas e Geoquímicas de Folhelhos*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.
- HELBIG, K. Simultaneous observation of seismic waves of different polarization indicates subsurface anisotropy and might help to unravel its cause. *Journal of Applied Geophysics*, v. 30, p. 1-24, 1993.
- TISSOT, B. P., WELTE, D. H. *Petroleum formation and occurrence . A new approach to oil and gas exploration*, Springer-Verlag, 1978.
- TYSON, R. V. *Sedimentary organic matter: organic facies and palynofacies*, Chapman & Hall, 1995.
- VERNIK, L., LANDIS, C. Elastic anisotropy of source rocks: implications for hydrocarbon generation and primary migration. *AAPG Bulletin*, v. 80, n. 4, p. 531-544, 1996.
- VERNIK, L., LIU, X. Velocity anisotropy in shales: a petrophysical study. *Geophysics*, v. 62, n. 2, p. 521-532, 1997.
- VERNIK, L., NUR, A. Ultrasonic velocity and anisotropy of hydrocarbon source rocks. *Geophysics*, v. 57, n. 5, p. 727-735, 1992.