



Usando o modelo de Thomsen para análise da composição e estrutura interna de folhelhos

José Agnelo Soares* - Departamento de Geologia – UFRJ.

Margareth da Silva Brasil Guimarães – Programa de Pós-Graduação em Geologia – UFRJ.

Copyright 2003, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper were reviewed by The Technical Committee of The 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does 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.

Abstract

In terms of seismic wave propagation shale may be treated as a VTI medium. This is a homogeneous transversely isotropic medium whose axis of symmetry is vertical. In other words, it is assumed that shale horizontal bedding is a result of hard and soft platelets interlamination. Hard platelets may be composed of hard minerals like quartz or some clay minerals, whereas soft ones are filled of organic matter and its fluids. For a VTI medium there are three mutually independent phase velocities (V_P , V_{SH} and V_{SV}) and five stiffness components (c_{11} , c_{12} , c_{33} , c_{44} and c_{13}). Thomsen suggested replacing these stiffness components with two vertical velocities (V_{P0} and V_{S0}) and three dimensionless anisotropy parameters (γ , ϵ and δ). The γ parameter depends on Poisson's ratio of the solid and on the ratio of the soft platelets porosity over their aspect ratio, but ϵ and δ parameters are, additionally, functions of fluid/solid bulk modulus ratio and soft platelets porosity. Thus, knowing the anisotropy Thomsen's parameters through wave velocities measurements in shale samples and adopting a value for soft platelets aspect ratio, fluid/solid bulk modulus ratio and soft platelets porosity can be determined. Finally, these variables may be analyzed in terms of mineral/organic composition, fluid saturation and spatial internal structure of shales.

Introdução

Materiais homogêneos que exibem anisotropia elástica hexagonal podem ser completamente representados por cinco constantes elásticas independentes: c_{11} , c_{12} , c_{33} , c_{44} e c_{13} . Folhelhos possuem planos horizontais de acamamento, o que permite classificá-los como meios VTI. A classe de meios VTI, uma subclasse da anisotropia hexagonal, possui anisotropia em torno de um eixo vertical. Utilizando amostras de folhelhos sacadas nas direções paralela, perpendicular e a 45° do plano de acamamento, obtêm-se as cinco constantes elásticas necessárias e suficientes para descrever o comportamento elástico dos folhelhos (Johnston & Christensen, 1995). Tomando o plano formado pelos eixos 1 e 2 como o plano paralelo ao acamamento e sendo o eixo 3 perpendicular a este plano, e ainda medindo-se em laboratório as velocidades da onda P

paralela V_{Ppar} , perpendicular V_{Pper} e a 45 graus do acamamento V_{P45} , e da onda S em amostras sacadas perpendicular V_{S0} e paralela ao acamamento V_{S90} , temos:

$$\begin{aligned} c_{11} &= \rho V_{Ppar}^2 \\ c_{33} &= \rho V_{Pper}^2 \\ c_{44} &= \rho V_{S0}^2 \end{aligned} \quad (1)$$

$$c_{12} = c_{11} - 2\rho V_{S90}^2$$

$$c_{13} = -c_{44} + \left[4\rho^2 V_{P45}^4 - 2\rho V_{P45}^2 (c_{11} + c_{33} + 2c_{44}) + (c_{11} + c_{44})(c_{33} + c_{44}) \right]^{1/2}$$

onde ρ é a densidade da amostra.

De acordo com Thomsen (1986, 1995) um meio VTI apresenta as seguintes velocidades de fase em função do ângulo Θ (definido como o ângulo entre o eixo de simetria e a direção de propagação da onda):

$$\begin{aligned} V_P^2(\Theta) &= V_{P0}^2 \left(1 + 2\delta \sin^2 \Theta \cos^2 \Theta + 2\epsilon \sin^4 \Theta \right) \\ V_{SV}^2(\Theta) &= V_{S0}^2 \left[1 + 2 \frac{V_{P0}^2}{V_{S0}^2} (\epsilon - \delta) \sin^2 \Theta \cos^2 \Theta \right] \end{aligned} \quad (2)$$

$$V_{SH}^2(\Theta) = V_{S0}^2 (1 + 2\gamma \sin^2 \Theta)$$

onde V_{P0} e V_{S0} são as velocidades das ondas P e S na direção $\Theta = 0$, V_{SV} é a velocidade da onda S polarizada na vertical e V_{SH} é a velocidade da onda S polarizada horizontalmente, e

$$\begin{aligned} \epsilon &\equiv \frac{c_{11} - c_{33}}{2c_{33}} \\ \gamma &\equiv \frac{\left(\frac{c_{11} - c_{12}}{2} \right) - c_{44}}{2c_{44}} \\ \delta &\equiv \frac{(c_{13} + c_{44})^2 - (c_{33} - c_{44})^2}{2c_{33}(c_{33} - c_{44})} \end{aligned} \quad (3)$$

são os parâmetros que definem a forma das superfícies das velocidades das ondas P e S.

Portanto, conhecendo-se as cinco constantes elásticas calculadas a partir das velocidades V_{Ppar} , V_{Pper} , V_{P45} ,

V_{S0} e V_{SH} , são conhecidos também os parâmetros de anisotropia ε , γ e δ .

Por outro lado, Thomsen (1995) também apresentou estes parâmetros de anisotropia como função de variáveis petrofísicas (aqui apresentados com um asterisco) que permitem interpretar a composição e a estrutura espacial interna da rocha. Thomsen considerou o caso da anisotropia causada por fraturas alinhadas em uma dada direção, as quais são preenchidas por fluidos que interagem com a porosidade primária da rocha. Assumindo fraturas com a forma de elipsóides circulares e porosidade primária baixa, os parâmetros de anisotropia são dados por

$$\varepsilon^* = \frac{8}{3} \left(1 - \frac{K_f}{K_s}\right) D_{cp} \eta_c$$

$$\gamma^* = \frac{8}{3} \left(\frac{1 - v_s}{2 - v_s}\right) \eta_c \quad (4)$$

$$\delta^* = 2(1 - v_s)\varepsilon - 2 \left(\frac{1 - 2v_s}{1 - v_s}\right) \gamma$$

onde v_s é a razão de Poisson do arcabouço sólido da rocha e K_f e K_s são os módulos volumétricos do fluido e do arcabouço sólido, respectivamente. D_{cp} é um fator de influência de fluido que, para frequências relativamente altas como nas medições ultra-sônicas realizadas em laboratório, é dado por

$$D_{cp} = \left[1 - \frac{K_f}{K_s} + \frac{K_f}{K_s \phi_c} \{A_c(v_s)\eta_c\}\right]^{-1}$$

onde ϕ_c é a porosidade secundária (de fratura) e

$$A_c(v_s)\eta_c = \frac{16}{9} \left(\frac{1 - v_s^2}{1 - 2v_s}\right) \eta_c$$

η_c é a densidade de fratura do meio que é dada por

$$\eta_c = \frac{3}{4\pi} \frac{\phi_c}{(c/a)}$$

e a razão (c/a) é a razão de aspecto das fraturas (espessura / diâmetro).

Método proposto

Neste trabalho propõe-se utilizar o modelo de Thomsen para avaliar a composição e a estrutura interna de folhelhos pela substituição do meio com fraturas alinhadas preenchidas por fluidos por um outro meio equivalente. Este meio equivalente corresponde ao folhelho, assumido como composto por um arcabouço sólido entremeado por inclusões elipsoidais alinhadas e formadas por matéria orgânica e fluido saturante.

Substituindo η_c na equação de γ^* e fazendo-se as manipulações necessárias, chega-se à seguinte expressão para a variável $R_c = \phi_c/(c/a)$:

$$R_c = \frac{\pi \gamma^* (2 - v_s)}{2(1 - v_s)} \quad (5)$$

Considerando que o valor de γ , derivado das constantes elásticas, é igual ao valor de γ^* , pode-se calcular o valor de R_c correspondente para qualquer valor de v_s .

Por sua vez substituindo D_{cp} e η_c na expressão de ε^* , após alguma manipulação algébrica, pode-se escrever

$$\varepsilon^* = \frac{2R_c(1 - K_r)}{\pi(1 - K_r) + K_r \left[\frac{4(1 - v_s^2)}{3(c/a)(1 - 2v_s)} - \pi \right]}$$

ou

$$K_r = \frac{2R_c - \pi \varepsilon^*}{\varepsilon^* \left[\frac{4(1 - v_s^2)}{3(c/a)(1 - 2v_s)} - \pi \right] + 2R_c} \quad (6)$$

onde $K_r = K_f / K_s$.

Propõe-se usar as equações (5) e (6) de modo iterativo, ou seja, fazendo o valor de v_s variar de 0.00 a 0.50 em passos de 0.01, calcula-se para cada valor de v_s os valores de R_c e K_r correspondentes. Para isto deve-se assumir um valor para a razão de aspecto c/a das inclusões de matéria orgânica. A seguir, usando-se as equações (4), calculam-se os parâmetros ε^* , γ^* e δ^* correspondentes, comparando o valor de δ^* com o valor do parâmetro original δ . Quando o valor de δ^* converge para o valor de δ , ficam estabelecidos os valores das variáveis v_s , R_c e K_r que respeitam o padrão de anisotropia observado na rocha.

Exemplo de aplicação do método proposto

Johnston e Christensen (1995) mediram, em laboratório, as velocidades necessárias à definição das cinco constantes elásticas em amostras de folhelhos coletadas em sete afloramentos distintos. Em cada amostra as constantes elásticas foram medidas em três níveis de pressão hidrostática. Adicionalmente, a composição das amostras foi investigada por difração de raios X e microscopia eletrônica.

Neste trabalho, os resultados apresentados por Johnston e Christensen (1995) são usados para exemplificar a aplicação do método proposto para a investigação da composição e estrutura espacial interna de folhelhos.

A Tabela 1 fornece a interpretação para as composições mineralógicas aproximadas dos folhelhos amostrados no trabalho de Johnston e Christensen (1995). Nesta interpretação considerou-se o teor de argila como a soma dos teores de Al_2O_3 , Fe_2O_3 e MgO , o teor de carbonato igual ao teor de CaO e, finalmente, o teor de matéria orgânica como sendo o teor complementar, o qual inclui a matéria perdida em ignição, fluidos e elementos traços.

Assumindo uma razão de aspecto igual a 1/10 para as inclusões de matéria orgânica, ou seja, considerando que as inclusões têm a forma aproximada de elipsóides

achatados cujo diâmetro corresponde a dez vezes a sua espessura, e aplicando o método proposto de avaliação da composição e estrutura interna dos folhelhos, chegou-se aos resultados apresentados na Tabela 2.

Com os parâmetros petrofísicos apresentados na Tabela 2 foram calculadas as velocidades das ondas que se propagam em um plano vertical das amostras. Essas velocidades variam com o ângulo Θ medido entre o eixo de isotropia (vertical) e a direção de propagação da onda. A Figura 1 apresenta as velocidades das ondas que se propagam em um plano vertical da amostra TH-26 como função do ângulo Θ . Na Figura 2 estas mesmas velocidades são apresentadas na forma de um mapa, em coordenadas polares, das velocidades em um plano vertical da amostra TH-26. Nestas figuras as cores azul, verde e vermelha indicam que a pressão hidrostática é de 10 MPa, 50 MPa e 100 MPa, respectivamente. As demais amostras apresentam comportamento semelhante.

Como se pode observar na Figura 2, meios com anisotropia VTI apresentam valores máximo e mínimo de velocidade de propagação das ondas P e Sh para Θ igual a 90° e 0° , respectivamente. Para a onda Sv esses extremos ocorrem com Θ igual a 45° e 0° . Definindo a anisotropia de uma onda como $(V_{\max} - V_{\min})/V_{\max}$ em percentual, e utilizando os parâmetros petrofísicos listados na Tabela 2, foram encontrados os valores de anisotropia para as ondas P, Sh e Sv apresentados na Tabela 3.

Discussão dos Resultados

O primeiro ponto a ser discutido diz respeito à razoabilidade da escolha da razão de aspecto $c/a = 1/10$. As imagens de microscopia eletrônica apresentadas no trabalho de Johnston & Christensen (1995) mostram inclusões orgânicas com essa razão de aspecto aproximada. A Figura 3, obtida com os dados da amostra TH-26 a 50 MPa de pressão hidrostática, mostra uma grande sensibilidade do método proposto à escolha da razão de aspecto c/a , especialmente para $a < 10$ (para $c=1$).

Mas seria também razoável aceitar uma razão K_f/K_s aproximadamente igual a 0.10? De acordo com a composição das amostras (ver Tabela 1) e usando o modelo de Hill para meios efetivos (Hill, 1952), é razoável admitir K_s em torno de 40 GPa, considerando que o arcabouço sólido é formado principalmente por quartzo (ou SiO_2 , na Tabela 1) e outros minerais duros. O valor de K_f seria próximo de 5 GPa, considerando as inclusões de matéria orgânica com composição semelhante a carvão betuminoso (Bourbié *et al.*, 1987). Isto dá uma primeira aproximação para a razão $K_f/K_s = 0.125$, o que não está muito longe do valor inicialmente sugerido $K_f/K_s = 0.10$. De acordo com a Tabela 2, as amostras TH-26, TH-51 e NEW-2 apresentaram valores de K_f/K_s muito próximos dessa primeira aproximação enquanto que as demais amostras apresentaram valores mais baixos para a razão K_f/K_s . Uma possível explicação para esses valores mais baixos de K_f/K_s seria a saturação das inclusões orgânicas por hidrocarbonetos, o que faria

baixar o valor de K_f . Outra possível razão seria o aumento do valor de K_s devido à presença de carbonato nestas amostras como pode ser visto na Tabela 1. Ou ainda, possivelmente, devido às duas razões juntas.

Uma vez aceito o valor da razão de aspecto c/a , pode-se então calcular, a partir de $R_c = \phi_c/(c/a)$, a porosidade secundária ϕ_c , que neste método de análise corresponde ao percentual de espaço poroso ocupado pelas inclusões de matéria orgânica.

A Figura 4 apresenta os valores calculados de porosidade secundária ϕ_c , como função da pressão hidrostática, para as sete amostras de folhelho investigadas. Observa-se uma suave tendência de diminuição nos valores de ϕ_c com o aumento da pressão hidrostática. Isto pode ser interpretado como um pequeno efeito da compressão exercida sobre as inclusões de matéria orgânica, diminuindo levemente o seu espaço.

Mais importante é a observação de que os valores de porosidade secundária ϕ_c para as amostras TH-26 e TH-51 são mais altos do que os das demais amostras, chegando a separar os dados em dois grupos: o de valores altos e o de valores baixos de ϕ_c . Os teores composicionais apresentados na Tabela 1 são novamente apresentados de forma gráfica na Figura 5. Nesta figura são apresentados os teores de sílica, argilominerais, carbonato e matéria orgânica para cada amostra estudada. Observa-se que há uma clara correspondência entre os teores de matéria orgânica das amostras e os correspondentes valores de ϕ_c , como já era esperado.

As figuras 6, 7 e 8 mostram como variam as anisotropias de velocidade das ondas P, Sh e Sv com o aumento de pressão hidrostática sobre as amostras. Dessas figuras vê-se que há uma forte correlação entre a anisotropia de velocidade dessas ondas, especialmente as ondas P e Sh, e a porosidade secundária mostrada na Figura 4. Ou seja, a anisotropia é fortemente influenciada pelos teores de matéria orgânica e argilominerais. No caso da onda Sv essa influência é menor e parece haver uma maior correspondência com a variação da razão K_f/K_s com a pressão, mostrada na Figura 9.

Usando as equações petrográficas de Thomsen, equações (4), uma razão de aspecto igual a 1/10 e admitindo uma razão $K_f/K_s = 5/40$, foram construídos os gráficos das figuras 10, 11 e 12. Destas figuras pode-se ver que, sendo conhecidos os parâmetros de anisotropia ϵ , γ e δ do modelo de Thomsen, restringem-se os valores possíveis das demais variáveis petrofísicas. Em outras palavras, dado um conjunto de parâmetros de anisotropia de uma amostra de folhelhos, provavelmente haverá apenas um outro conjunto de variáveis petrofísicas (ou alguns poucos conjuntos próximos entre si) que honram aqueles parâmetros de anisotropia, segundo o modelo de Thomsen.

Portanto, usando o modelo de Thomsen, é possível avaliar os parâmetros petrofísicos dos folhelhos a partir do conhecimento das velocidades de propagação das ondas P e S em três direções principais.

Conclusões

Embora o modelo de Thomsen não tenha sido formulado com o objetivo de investigar a composição e a estrutura interna das rochas, os resultados apresentados neste trabalho sugerem que ele pode ser aplicado com esta finalidade.

O método de avaliação aqui proposto é iterativo. Assume-se um valor para a razão de aspecto das inclusões orgânicas e comparam-se os resultados obtidos com os valores esperados para as propriedades mecânicas do arcabouço sólido e das inclusões orgânicas e seus fluidos. O processo de iteração termina quando são atingidos valores aceitáveis para essas propriedades.

Embora não tenha sido identificada essa ocorrência, os resultados obtidos por este método podem ser uma aproximação da realidade, uma vez que, a rigor, podem existir intervalos de valores aceitáveis para as propriedades petrofísicas. No entanto, esses intervalos de valores aceitáveis devem ser bastante restritos, o que não chega a comprometer a confiança no método.

A variação da pressão hidrostática externa imposta sobre as amostras provocou um efeito suave sobre a anisotropia de velocidades dos folhelhos analisados. Os fatores determinantes do nível de anisotropia foram a composição química da rocha e seus fluidos e a forma de distribuição das inclusões orgânicas dentro do arcabouço sólido da rocha.

Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito das atividades do Projeto CTPETRO "Análise Petrofísica Integrada de Folhelhos", com financiamento da PETROBRAS / FINEP e executado pelo Departamento de Geologia da UFRJ.

Referências

- Bourbié, T., Coussy, O. and Zinszner, B.,** 1987, Acoustics of porous media. Éditions Technip. Paris.
- Hill, R.,** 1952, The elastic behavior of crystalline aggregate: Proc. Phys. Soc. London, A65, p349-354.
- Hornby, B. E.,** 1995, The elastic properties of shales - laboratory experiments: Quarto Congresso da SBGf, Resumos expandidos, Vol. 2, p793-796.
- Johnston, J. E. and Christensen, N. I.,** 1995, Seismic anisotropy of shales: Journal of Geophysical Research, Vol. 100, N° B4, p5991-6003, April.
- Thomsen, L. A.,** 1986, Weak elastic anisotropy: Geophysics, Vol. 51, p1954-1966.
- Thomsen, L. A.,** 1995, Elastic anisotropy due to aligned cracks in porous rock: Geophysical Prospecting, Vol. 43, p805-829.

Tabela 1 – Composição das amostras (modificado de Johnston & Christensen, 1995).

Amostra	SiO ₂ (%)	Argilas (%)	Carbonato (%)	Matéria Orgânica (%)
TH-26	48.80	31.58	0.10	19.52
TH-51	51.58	31.56	0.05	16.81
NEW-2	65.59	20.85	0.06	13.50
NEW-3	63.03	21.81	1.16	14.00
NEW-5	62.15	20.12	2.97	14.76
NEW-7	60.55	20.83	3.92	14.70
ANT-1	58.25	21.88	0.37	19.50

Tabela 2 – Parâmetros petrofísicos calculados.

Amostra	Pressão (MPa)	v _s	K _f / K _s	φ _c (%)
TH-26	10	0.36	0.12703	31.8
	50	0.42	0.10322	30.6
	100	0.42	0.10972	29.5
TH-51	10	0.33	0.13287	27.5
	50	0.33	0.14607	27.3
	100	0.34	0.15347	26.9
NEW-2	10	0.10	0.13617	11.2
	50	0.36	0.10177	12.3
	100	0.39	0.09017	11.6
NEW-3	10	0.21	0.09653	12.1
	50	0.36	0.08963	12.9
	100	0.37	0.09311	12.2
NEW-5	10	0.37	0.05125	11.4
	50	0.38	0.06875	11.1
	100	0.40	0.06675	10.6
NEW-7	10	0.39	0.05925	11.8
	50	0.35	0.08825	10.6
	100	0.35	0.09475	10.1
ANT-1	10	0.41	0.07175	16.9
	50	0.39	0.09825	15.5
	100	0.38	0.11625	14.9

Tabela 3 – Anisotropias das ondas P, Sh e Sv.

Amostra	Pressão (MPa)	Anis. P (%)	Anis. Sh (%)	Anis. Sv (%)
TH-26	10	35.3	37.7	23.2
	50	31.1	35.8	17.3
	100	29.6	35.1	17.2
TH-51	10	34.0	35.5	23.3
	50	32.6	35.4	24.2
	100	30.9	34.9	24.0
NEW-2	10	25.1	22.8	13.8
	50	21.6	21.2	9.7
	100	20.1	20.0	8.3
NEW-3	10	27.1	22.8	11.0
	50	23.7	22.0	9.2
	100	21.9	21.0	9.0
NEW-5	10	26.0	20.0	5.9
	50	22.5	19.4	6.9
	100	20.7	18.5	5.8
NEW-7	10	24.2	20.2	6.2
	50	21.3	19.2	8.3
	100	19.8	18.5	8.2
ANT-1	10	26.6	25.5	9.1
	50	23.5	24.4	10.6
	100	21.8	23.9	11.9

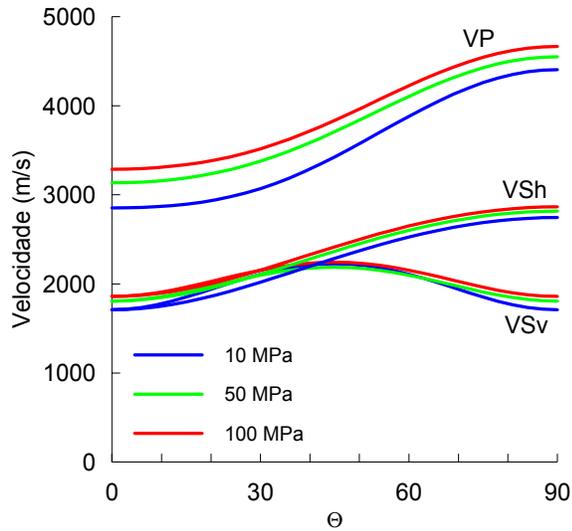


Figura 1 - Velocidades das ondas que se propagam em um plano vertical da amostra TH-26.

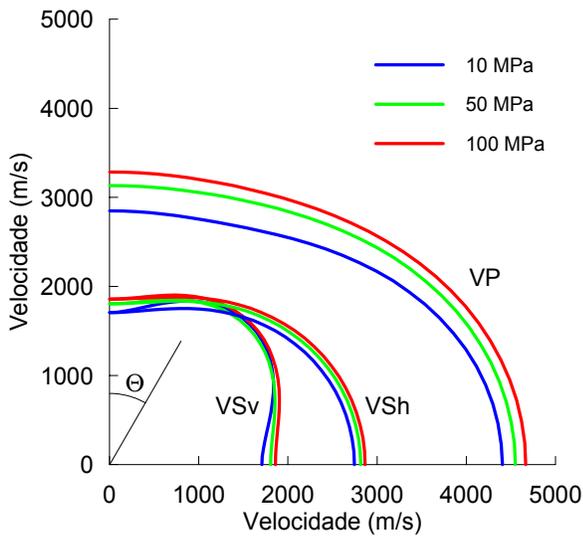


Figura 2 - Mapa das velocidades que se propagam em um plano vertical da amostra TH-26.

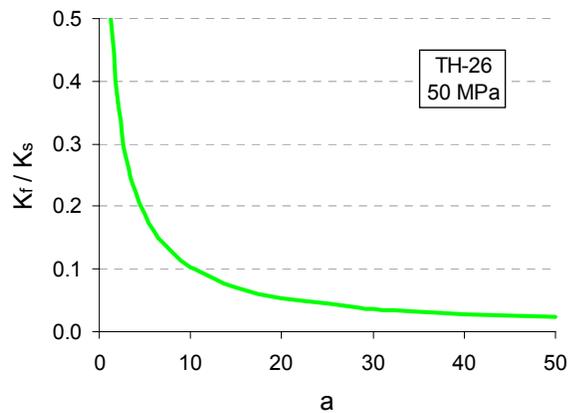


Figura 3 - Relação entre a razão de módulos do fluido e do sólido e o diâmetro das inclusões fluidas para a amostra TH-26 à 50 MPa.

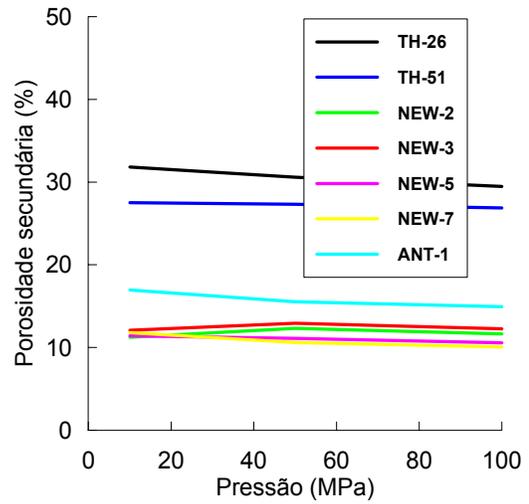


Figura 4 - Porosidade secundária ϕ_c como função da pressão hidrostática.

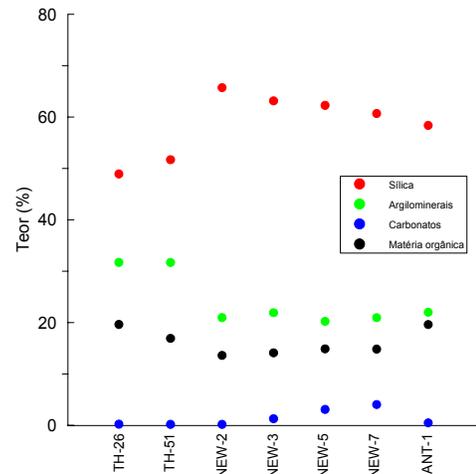


Figura 5 - Composição das amostras.

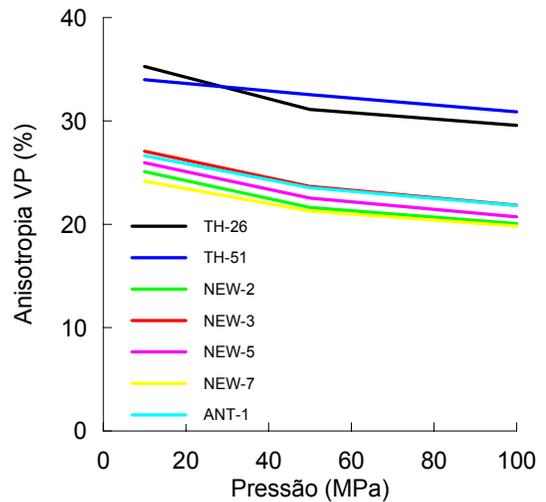


Figura 6 - Variação da anisotropia de velocidade da onda P com a pressão.

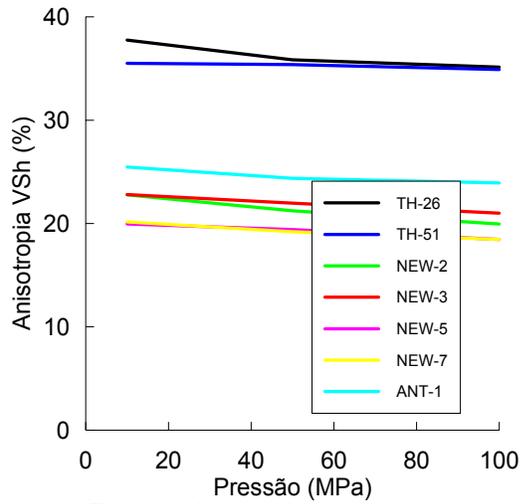


Figura 7 - Variação da anisotropia de velocidade da onda Sh com a pressão.

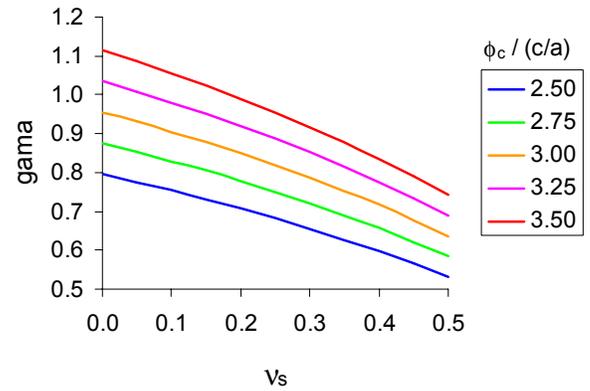


Figura 10 - Variação do parâmetro de anisotropia γ com v_s em função da razão $\phi_c / (c/a)$.

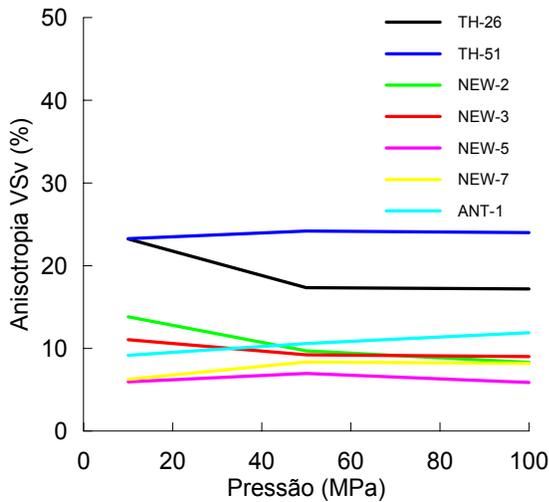


Figura 8 - Variação da anisotropia de velocidade da onda Sv com a pressão.

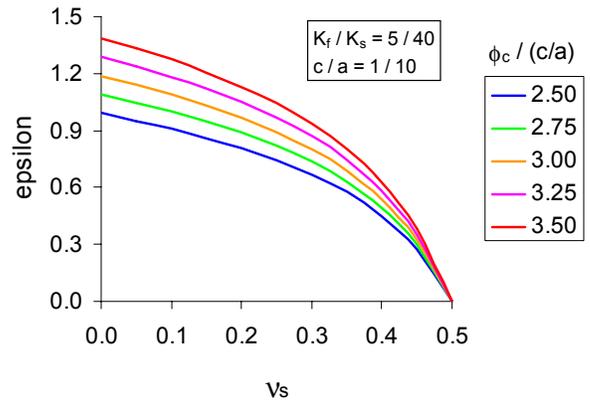


Figura 11 - Variação do parâmetro de anisotropia ϵ com v_s em função da razão $\phi_c / (c/a)$.

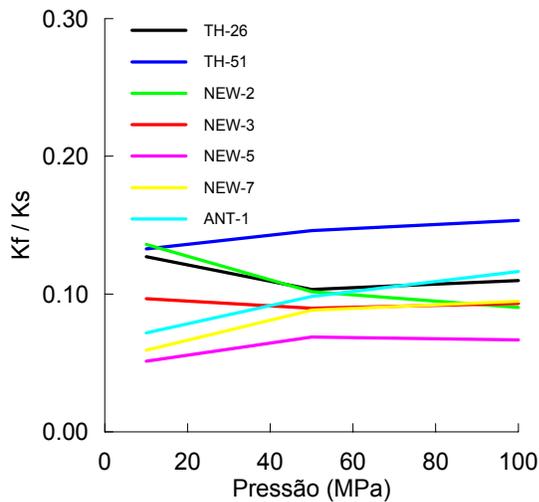


Figura 9 - Variação da razão K_f / K_s com a pressão.

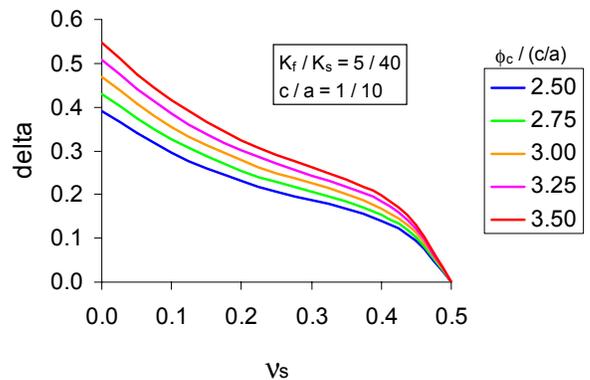


Figura 12 - Variação do parâmetro de anisotropia δ com v_s em função da razão $\phi_c / (c/a)$.