



Propagação de ondas ultrassônicas elásticas em modelos sintéticos com heterogeneidades esféricas

Rafael S. G. Gomes (Faculdade de Geofísica-UFPA), José J. S. de Figueiredo (Faculdade de Geofísica-UFPA e INCT-GP), Vinicius A. C. Diniz (Faculdade de Geofísica-UFPA), Thiago P. Prestes (Faculdade de Geofísica-UFPA), Horácio S. R. Ferreira (Faculdade de Geofísica-UFPA) e Lucas R. A. Nunes (Faculdade de Geofísica-UFPA)

Copyright 2017, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no 15th Congresso Internacional de Geofísica, Rio de Janeiro, 31 de julho a 03 de agosto de 2017. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do 15th CIGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Abstract

The manufacture of synthetic rocks samples has a great importance in the study of the elastic properties of the rocks based on the variation of heterogeneities. In this present work we constructed synthetic sandstones with different number of heterogeneities in the samples. In this work we constructed and analyzed (in dry condition and ambient conditions) eleven samples were constructed in this work. In total, ten heterogeneous samples and an isotropic sample for reference. The heterogeneous samples were divided in two groups (A and B). Group A with heterogeneities of 3.75 mm diameter and group B with heterogeneities of 5.67 mm diameter. From P- and S-waveforms were measured V_p and V_s velocities as well as V_p/V_s ratio. As expected both velocities decrease with increasing of scatter in the sample. However, was noted a decreasing more pronounced for V_p velocities for both groups and V_s for group B.

Introdução

O estudo da física de rochas é essencial quando se trata da prospecção de hidrocarbonetos, principalmente quando os reservatórios são aqueles formados por rochas porosas o suficiente para conter fluidos (água, gás e óleo). Como é conhecido estas rochas são chamadas de rochas reservatórios. O arenito é um dos grandes exemplos de rocha reservatório, tanto de petróleo quanto de gás, e essa acumulação ocorre entre os grãos das rochas, ou na heterogeneidades, fissuras ou fraturas (Barwis et al., 1990).

Utilizando modelos sintéticos heterogêneos (construídos de forma controlada), pode-se correlacionar as propriedades físicas com as velocidades de ondas compressão e cisalhantes. A variação de porosidade secundária (relacionado a espalhadores, fraturas, fissuras, etc) influência na velocidade, na qual as ondas ultrassônicas atravessam as rochas o que permite saber qual é a distribuição de heterogeneidades no reservatório, visto que quanto maior a porosidade, menor a velocidade das ondas e consequentemente, maior a chance de ter recursos naturais dentro das rochas reservatórios neste local de alta porosidade (Brown & Korringa, 1975). Portanto, o estudo da física das rochas é muito importante para o entendimento de suas

propriedades e os fluidos presentes nos poros, isso permite ter interpretações para relacionar particularidades sísmicas com os parâmetros conhecidos no reservatório para prospectar hidrocarbonetos.

Neste trabalho, a metodologia aplicada na produção das amostras sintéticas foi criada por Santos et al. (2017). Neste trabalho é simulado um arenito heterogêneo sintético com uma certa concentração de areia com cimento. Esse método é bastante importante para a modelagem física, pois tem um material similar comparando as propriedades físicas de um arenito real (Santos et al., 2016). No total 11 amostras foram construídas e analisadas em condição. Doze delas com heterogeneidades e uma isotrópica homogênea. As amostras heterogêneas foram divididas em dois grupos (A e B) de cinco amostras (cada grupo possui um tamanho diferente de heterogeneidade). Resultados mostram que para ambos os grupos as velocidades das ondas P e S decrescem com o aumento do número de espalhadores. No entanto, V_p apresenta uma maior dependência do que V_s no caso do grupo A. No entanto, no caso do grupo B, a velocidade da onda S parecer depender mais do diâmetro das heterogeneidades.

Metodologia

A construção dos modelos heterogêneos e as medidas ultrassônicas foram realizadas no Laboratory of Petrophysics and Rock Physics-Dr. Om Prakash Verma (LPRP), na Universidade Federal do Pará (UFPA).

Construção das amostras

O processo de produção dos modelos sintéticos começa a partir da determinação de dois grupos contendo cinco amostras em cada um. Elas são subdivididas nos grupos no tipo A e B e uma amostra de referência sem heterogeneidades. Esses grupos serão subdivididos pela quantidade de heterogeneidades e também, pelo diâmetro médio das heterogeneidades de cada grupo de amostras, no qual foram 3,53 e 5,67 mm, respectivamente. A partir da determinação destes fatores, o passo a seguir foi determinar a porcentagem de areia peneirada e cimento para satisfazer a amostra sintética de estudo, no qual foi 35% de cimento e 65% de areia para a simulação de um arenito (com porosidade média primária de 10%), essa mistura com uma certa quantidade de água forneceu uma consistência na mistura para ser colocada ao vasilhame.

Realizando estes processos, foi utilizado um vasilhame (cano) de 37.56 mm de diâmetro e cerca de 50 mm de

altura para alocar a mistura e as heterogeneidades, o processo de alocação das heterogeneidades teve o auxílio de um outro cano com 20,48 mm. Esse serviu para que as mesmas ficassem bem centralizadas e que não ocorresse o risco de ir para as laterais, a Figura 1 mostra esse processo. Com isso, foram feitos os modelos no grupo A contendo A-30, A-40, A-50 e A-70, e grupo B subdivididas em B-15, B-25, B-35, B-45 e B-55. Os números correspondentes aos lados das letras são os números de heterogeneidades colocadas em cada amostra. Após o processo de alocação da massa, as amostras ficaram durante 24 horas para a secagem em temperatura ambiente, esse tempo fez com que a amostra tivesse uma solidificação sem a criação de fissuras. Após a solidificação estas amostras foram colocada em um líquido como o objetivo de diluir todas as heterogeneidades e restando apenas espaço vazios esféricos. Essa técnica foi desenvolvida por Santos et al (2017) para criação de modelos heterogêneos e anisotrópicos. As figuras abaixo mostram as etapas do processo de confecção dos modelos.

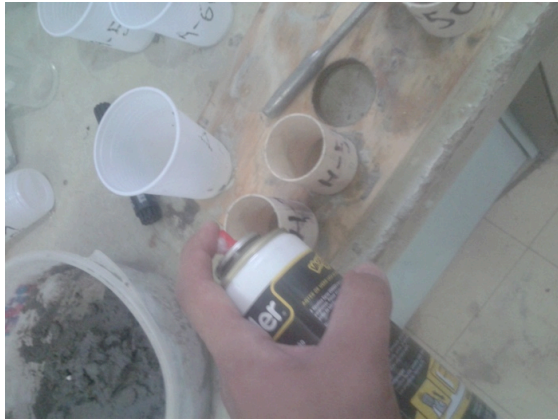


Figure 1: This picture, shows the vaseline spray being passed in the bottle to make it easy to remove the sample.



Figure 2: The use of the other pipe guaranteeing the location of the heterogeneities inside of the sample.

O próximo passo a seguir, foi a realização de medidas, tais como: massa seca, massa saturada, comprimento, diâmetro, densidade e volume (ver a Tabelas 1 e 2 para os valores medidos). Foi utilizado uma balança analítica e um paquímetro, e assim, realizando as medidas de massa (seca e saturada) e comprimento. Obtendo essas informações, foi possível estimar da porosidade de cada amostra confeccionada (de uma maneira aproximada). A porosidade (ver a Tabelas 1 e 2 para os valores medidos). foi estimada por

$$M_{\text{água}} = M_{\text{saturada}} - M_{\text{seca}}$$

$$\rho_{\text{água}} = 1 = M_{\text{água}} / V_{\text{água}}$$

$$V_{\text{total}} = \pi r^2 h \text{ (da amostra)}$$

$$\text{Porosidade } (\Phi) = V_{\text{água}} / V_{\text{total}} \quad (1)$$

no qual r e h são o raio e altura do plug enquanto M é a massa da amostra (seca ou saturada). Para evitar contaminação de impurezas, na equação 1 o tipo de água utilizada foi a destilada.

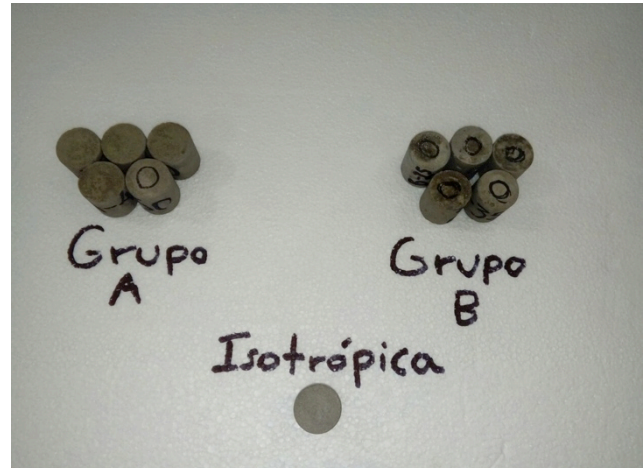


Figure 3: The heterogeneous models related to groups A and B and the reference model.

Medidas ultrassônicas

As aquisições de dados ultrassônicos foram realizadas utilizando o sistema ultrassônico do LPFR. Foi utilizada a técnica de transmissão de pulso ultrassônicos (Santos et al., 2016). O sistema do LPFR é formado por um gerador e receptor de pulso 5072PR e um pré-amplificador 5660B, ambos da Olympus, um osciloscópio USB de 50 MHz da Handscope, e quatro transdutores. Sendo dois de 1 MHz (Onda P) e dois 500 kHz (Onda S), também da Olympus. A Figura 4 mostra esses equipamentos citados acima.

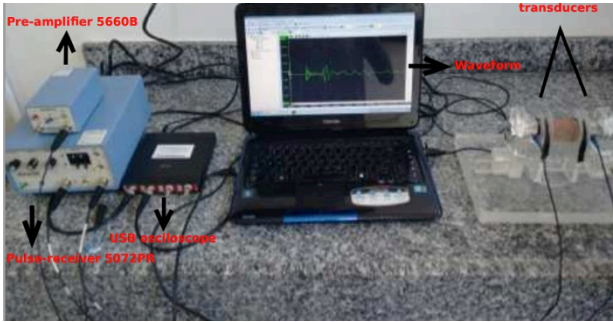


Figure 4: This figure shows two transducers (source and receiver) of S / P wave and the other equipment's that compose the ultrasonic system (pulse-receiver and pre-amplifier).

A taxa de amostragem por canal para todas as medidas das formas de onda P e S foi de 0.01 s. Para a medição os transdutores ficaram separados pelo comprimento do modelo. Os transdutores foram centralizados nas amostras para assegurar que a propagação de ondas estava na região desejada, pois as heterogeneidades estão bem no centro dos modelos. Isto foi feito tanto para as aquisições das ondas P e S, os dados ultrassônicos coletados nos modelos foram o tempo de chegada das ondas P/S.

Resultados

A partir da aquisição dos traços, foi realizado o tratamento dos dados adquiridos através do sistema ultrassônico no LPRP, esse tratamento foi realizado no ferramenta matemática computacional MatLab[®]. Devido a presença de ruído inerente do sistema, foi aplicado uma suavização nos dados para retirada de ruídos aleatórios e ruídos de rede. Os gráficos da Figura 5a) e b), mostram os traços sísmicos para os grupos d amostra A e B. Foi realizado uma picagem manual dos tempos de chegadas das ondas P e S. Nas Tabelas 1 e 2 estão mostrados os tempos de trânsito (para ondas P e S) para cada amostra. A partir dos tempos de chegadas dos traços sísmicos e com os valores do comprimento e do tempo pode-se encontrar a velocidade das ondas P e S (também mostradas nas Tabelas 1 e 2).

O comprimento médio utilizado no grupo A foi cerca de 44.1 mm na qual foram moldados para que ficasse dentro dessa média, para não influenciar na porosidade e na velocidade para que não haja discordâncias na hora de expor os gráficos, outro é que a densidade fica entre 1.9 e 1.97 dentro do limite desejado para simulação do arenito. Apesar de tentar deixar o comprimento igual, acaba que ele fica variando bem pouco, com isso, acaba influenciando em algumas medidas. As velocidades P calculadas pelo tempo de chegada, verifica-se que fica uma oscilação bem pequena por conta do comprimento das amostras, já a velocidade da onda S decai também com o aumento da porosidade.

Group A	A-30	A-40	A-50	A-60	A-70
Lenght (mm)	44.95	44.85	43.88	43.35	43.47
Dry mass (g)	96.68	97.21	95.86	91.20	92.10
Saturated Mass (g)	103.16	103.86	102.88	98.20	99.96
Porosity (Φ)	0.131	0.135	0.14	0.146	0.16
Volume (cm ³)	49.77	49.66	48.59	48	48.13
Density (g/cm ³)	1.97	1.95	1.94	1.91	1.90
P wave arrival time (s)	13.71	14.12	13.86	13.67	13.69
S wave arrival time (s)	21.8	22.49	22.46	22.06	22.49
P-wave velocity (m/s)	3278.6	3176.3	3165.9	3117.2	3175.3
S-wave velocity (m/s)	2061.9	1994.2	1953.7	1965.1	1932.9

Table 1: The table shows the measurements performed in-group A of the heterogeneous models, performed in LPRP.

Group B	B-15	B-25	B-35	B-45	B-55
Lenght (mm)	44.54	45.78	46.09	45.22	44.94
Dry mass (g)	94.09	95.0	96	88	85
Saturated Mass (g)	99.43	101.35	103.15	96.2	94
Porosity (Φ)	0.107	0.1272	0.144	0.1623	0.178
Volume (cm ³)	49.32	50.69	51.04	50.07	49.76
Density (g/cm ³)	2.06	1.98	1.97	1.87	1.86
P wave arrival time (s)	12.97	13.72	14.01	13.86	14.19
S wave arrival time (s)	22.38	23.74	24.02	24.06	26.15
P-wave velocity (m/s)	3434.1	3336.7	3289.8	3262.6	3167
S-wave velocity (m/s)	1990.2	1928.4	1918.8	1879.5	1718.5

Table 2: The measurements performed in-group B of the heterogeneous models, performed in LPRP.

Mesma análise feita para o grupo A, será feito para o grupo B, pode-se verificar que a densidade decai com o aumento das heterogeneidades por conta do tamanho médio do diâmetro das mesmas do modelo. A comparação das velocidades P/S é bem satisfatório, pois na tabela, as velocidades decaem em função do aumento das heterogeneidades, e assim, pode-se obter o gráfico das velocidades na Figura 6.

(a)

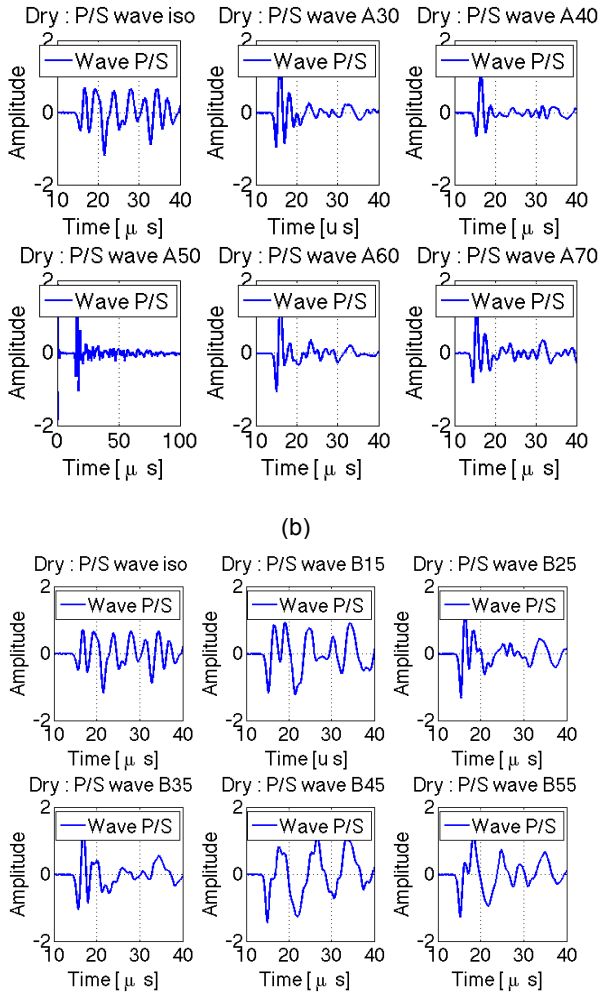


Figure 5: The figure shows the seismic traces with the reference model and the models of a) group A and b) group B in the y direction that are in function of the amplitude with time.

A partir dos tempos de trânsito dados adquiridos nesses traços nos grupos A e B, foi obtida a estimativa das velocidades das onda P e S. As Figuras 6 e 7 mostram as velocidades P/S para os grupos de amostras A e B e para a amostra de referência. Como pode ser observado a partir no gráfico da Figura 6, ambas as velocidades decaem com o aumento do número de heterogeneidades. No entanto o decréscimo da velocidade da onda P é mais acentuado do que a onda S. Já a Figura 7, as velocidades decaem bastante em relação a figura anterior. Como pode ser observado, ambos os modos decaem proporcionalmente na mesma taxa. Dois parâmetros precisam ser observado nestes casos (diâmetro médio da heterogeneidade e número de heterogeneidades). Isso pode ser interpretado por conta do diâmetro das heterogeneidades. Na caso das amostras do grupo B, a partir da amostra B45 a razão entre o tamanho da heterogeneidade e o comprimento de onda é 1.69.

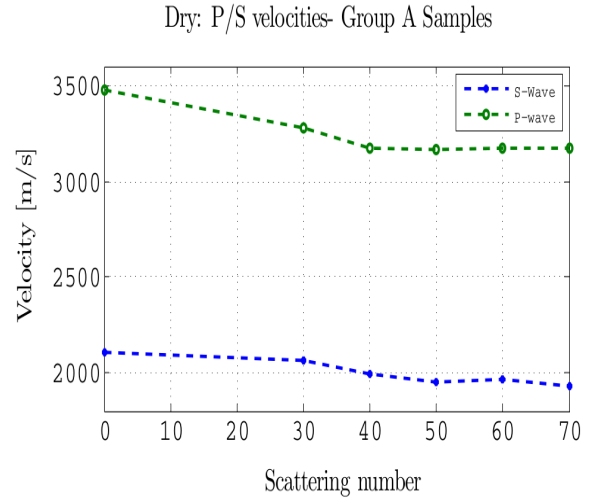


Figure 6: The graph shows the P / S velocities as function of the heterogeneities number for samples of group B.

A partir destes gráficos, podemos fazer a comparação de que a velocidade diminui de acordo com o aumento da porosidade, isso aconteceu na velocidade da onda P e S, com isso, comprovando os modelo empíricos de Han *et al.* (1986) e Castagna *et al.* (1985) que relacionam as velocidades de ondas ultrassônicas em relação a porosidade. Como pode ser observado nas Figuras 6 e 7, as velocidade da onda P decai mais rápido do que a velocidade de onda S em relação ao aumento da porosidade. Esse decaimento é mais acentuado para o grupo de amostra com maior número de espalhadores esféricos. Apesar das velocidades do grupo A não decair tão rápido, tanto que aparenta ter uma velocidade constante, isso pode ter influenciado por conta dos diâmetros dos poros. A partir dessas velocidades, será feito uma comparação interpretativa das velocidades em sua razão e diferença.

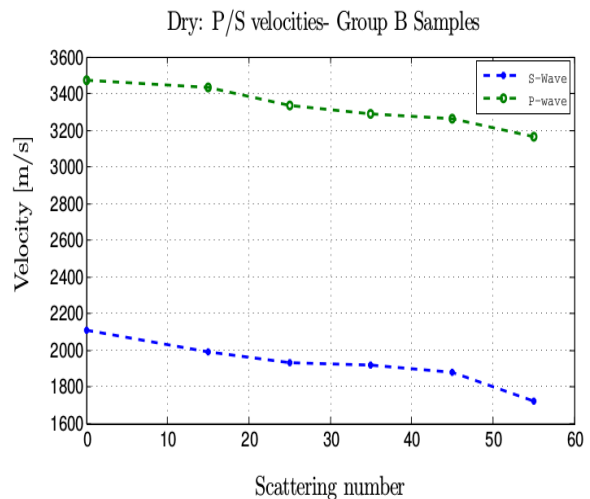


Figure 7: The graph shows the P / S velocities as function of the heterogeneities number for samples of group B.

Figure 8 mostra as velocidades P e S em função da porosidade total (primária + secundária). Como pode ser notado as velocidades diminuem com o aumento da porosidade total para ambos os grupos. Esse decréscimo é mais acentuado para onda P em ambos os grupos. Isso deve ocorrer devido o decréscimo acentuado do módulo de incompressibilidade da amostra.

O Figura 9 mostra a razão V_P/V_S em função o número de heterogeneidades. Como pode ser visto, o grupo de amostras A apresenta uma razão V_P/V_S menor que o grupo de amostra B. Isso significa, que o aumento do diâmetro da fissura afetou a velocidade S em relação aos valores apresentados para grupo A. A Figura 10 mostra a diferença entre as velocidades VP e VS. Pode-se perceber que no grupo A, partindo da amostra de referência, a velocidade da onda P está sendo afetada a partir do aumento das heterogeneidades, ela se estabiliza e assim, o decaimento das diferenças da velocidade apresenta uma pequena variação. No entanto os valores da diferença para grupo B apresenta um aumento na diferença. Isso foi observado na Figura 7b que a velocidade da onda S está sendo bastante afetada pelo aumento das heterogeneidades.

Discussão e Conclusões

Este trabalho mostra a importância da modelagem física para simulações de modelos isotrópicos heterogêneos. Como mencionado, estas amostras foram feitas baseadas na metodologia desenvolvida por Santos et al. (2017) para a fabricação de amostras porosas sintéticas (no contexto isotrópico e anisotrópico). Como foi observado, para as amostras do grupo A e B, a velocidade da onda P foi bastante afetada concentração de heterogeneidade.

No caso do grupo B, a velocidade da onda S foi bastante afetada por conta do aumento do diâmetro das heterogeneidades. Isso foi percebido através de gráficos da razão V_P/V_S e diferença das velocidades P e S. Dessa forma, pode-se supor que o tamanho das heterogeneidades influenciam bastante na velocidade, isso foi bem perceptível diante dos gráficos de velocidades P e S dos dois grupos (A e B).

Novas amostras estão sendo feitas com diâmetros maiores e geometrias diferentes, como o objetivo de consolidar as hipóteses citadas anteriormente assim como testar os modelos empíricos para entender a relação entre V_P/V_S com porosidade (Krief, 1990; Han 1986) e modelos de meio efetivo para meios heterogêneos isotrópicos (ex, Kuster & Toksöz 1974).

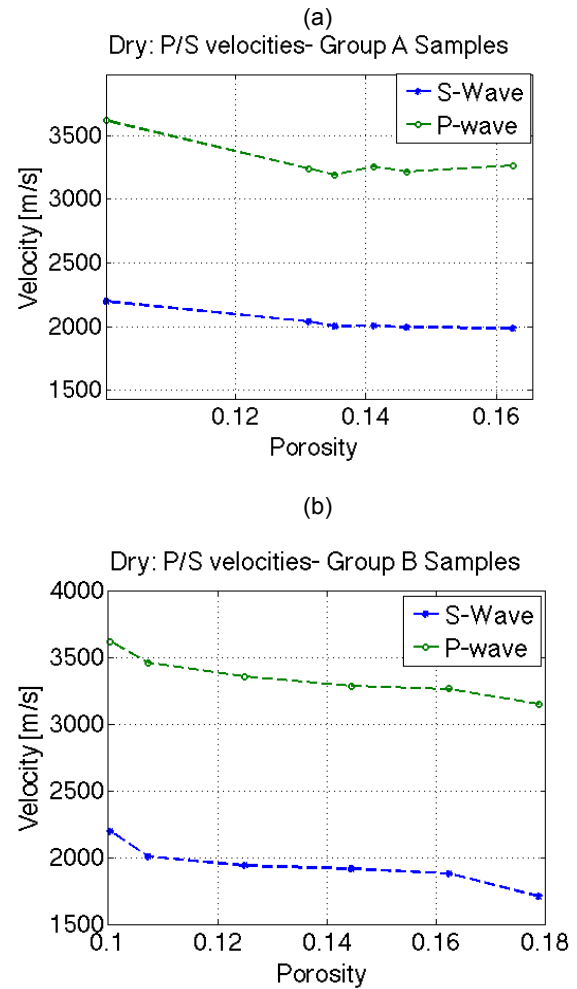


Figure 8: V_p and V_s velocities versus total porosity. As it can be noted, both velocities decrease with the increasing of porosity.

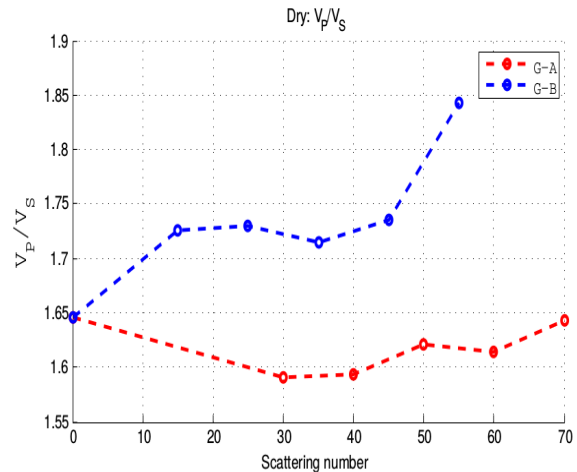


Figure 9: The graph shows the relation between the V_P/V_S ratio and the number of heterogeneities.

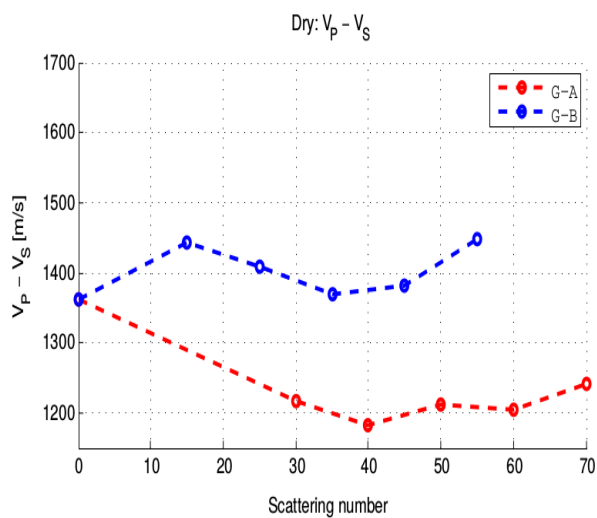


Figure 10: The graph of the relation between the P / S velocities of groups A and B as a function of the number heterogeneities.

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer ao CNPq (459063/2014-6) e a PROPESP-UFPA pelo suporte financeiro. Também gostaríamos de agradecer ao PET-MEC-UFPA por ter proporcionado ajuda de custo na construção dos modelos e a entrada de dois alunos neste trabalho. E também, a Dr. Carolina Barros tutora do PET-Geofísica.

Referências

Barwis, John H., John G. McPherson, Joseph R.J. Studlick, 1990. Sandstone Petroleum Reservoirs, Springer Verlag..

Brown, Robert J. S., and Jan Korrिंगa (1975). ON THE DEPENDENCE OF THE ELASTIC PROPERTIES OF A POROUS ROCK ON THE COMPRESSIBILITY OF THE PORE FLUID. GEOPHYSICS, 40(4), 608-616. doi: 10.1190/1.1440551.

Castagna, J.; Batzle, M., 1986; Eastwood, R. et al. Relationships between compressional wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks. Geophysics, v. 50, n. 4, p. 571–581.

De Figueiredo, J. J. S., 2012, Modelagem física para meios fraturados anisotrópicos e estudo da birrefringência sísmica em função dos parâmetros anisotrópicos, Tese de Doutorado, UNICAMP.

Han, D.; Nur, A.; Morgan, D., 1986; Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones. Geophysics, v. 51, n. 11, p. 2093–2107.

Krief, M., J. Garat, J. Stellingwerff, and J. Ventre, 1990, A petrophysical interpretation using the velocities of p and s waves (full waveform sonic), The Log Analyst, 31, 355 – 369.

Kuster, G.T. and Toksoz, M.N., 1974. Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media. Geophys., 39, 587–618.

Santos, L. K., De Figueiredo, J. J. S., and Da Silva, C. B., 2016, A study of ultrasonic physical modeling of isotropic media based on dynamic similitude: Ultrasonics, 70, 227-237.

Santos, L. K., De Figueiredo, J. J. S., Macedo, D. L., and Da Silva, C. B., 2017, A new way to construct synthetic porous fractured médium: Journal of Petroleum Science and Eng., Manuscript under Revision.