



Propagação numérica de ondas P e S em modelos digitais de rochas

Welington Barbosa de Sousa¹, José Agnelo Soares¹, ¹Universidade Federal de Campina Grande

Copyright 2018, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no VIII Simpósio Brasileiro de Geofísica, Salinópolis, 18 a 20 de setembro de 2018. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do VIII SimBGf, 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.

Resumo

Neste trabalho é realizada a análise numérica transiente, pelo método dos elementos finitos, da propagação de ondas elásticas (P e S) em modelos digitais de arenitos e carbonatos. Os modelos digitais são construídos a partir de imagens de microtomografia (microCT) de raios x de amostras reais dessas rochas. Adicionalmente as velocidades de propagação das ondas elásticas foram medidas fisicamente em laboratório em amostras dessas rochas, das quais foram extraídas subamostras para imageamento por microCT. As velocidades obtidas pelo método numérico foram comparadas às medidas em laboratório. Considerando as velocidades fisicamente medidas em laboratório como o padrão de calibração, as velocidades estimadas pelo método numérico foram consideradas satisfatórias, tendo apresentado desvios positivos de até 2,8% para o caso da onda P, e de até 3,4% para o caso da onda S.

Introdução

A velocidade de propagação das ondas elásticas por uma rocha sofre influência dos seus constituintes minerais, do ambiente de formação, da porosidade, da seleção das partículas, da forma dos poros, dentre outras variáveis (Bourbié *et al.*, 1987; Mavko *et al.*, 2009).

O método sísmico de exploração utiliza as propriedades de propagação das ondas elásticas em subsuperfície para investigar as estruturas geológicas, os tipos de rocha e os fluidos que saturam essas rochas. Essas características geológicas são inferidas a partir das velocidades e amplitudes das ondas elásticas (Avseth *et al.*, 2005; Yilmaz, 2001).

Devido ao grande número de variáveis que afetam as propriedades elásticas das rochas, entender quais dessas variáveis controlam as velocidades elásticas de uma determinada formação geológica em particular não é uma tarefa fácil. Mesmo quando essas velocidades são medidas laboratorialmente, muitas vezes é preciso realizar um extenso programa de caracterização dessas rochas, em escala micrométrica, para observar as relações entre grãos minerais e poros (Bourbié *et al.*, 1987; Avseth *et al.*, 2005).

A microtomografia de raios x é uma técnica que vem sendo recentemente aplicada para a caracterização tridimensional da estrutura interna do arcabouço mineral e da distribuição espacial dos poros das rochas

(Knackstedt *et al.*, 2009; Dvorkin *et al.*, 2011; Medeiros & Soares, 2012; Porto, 2015; Apolinário, 2016).

A petrofísica computacional simula as propriedades físicas das rochas através de modelos digitais gerados em softwares que compilam imagens tomográficas bidimensionais, criando um modelo 3D que contém toda a estrutura interna da rocha. Uma vantagem da utilização de modelos digitais de rocha é a possibilidade de quantificar várias propriedades físicas das rochas sob praticamente quaisquer condições imagináveis de pressão, temperatura e saturação. Para isso é preciso dispor de imagens com resolução suficiente para reconhecer e quantificar as estruturas que controlam o comportamento físico das rochas (Medeiros & Soares, 2012). Como as simulações computacionais não alteram os modelos digitais de rocha, esta técnica torna-se ainda mais interessante, uma vez que as técnicas convencionais alteram as propriedades das amostras pelas mudanças constantes nas condições de pressão, temperatura e saturação fluida das amostras.

Porto (2015) e Apolinário (2016) simularam a propagação de ondas acústicas em modelos digitais de rochas utilizando o método de elementos finitos. No entanto, o algoritmo de simulação por eles empregado não permitia a simulação da propagação da onda S.

Com o objetivo de preencher esta lacuna, este trabalho tem como objetivo a geração de um modelo matemático capaz de simular a propagação de ondas cisalhantes (S) em rochas sedimentares (arenitos e carbonatos) a partir de imagens microtomográficas de raios x.

Neste trabalho duas amostras de arenito (A7 e A9), extraídas da Formação Antenor Navarro da Bacia do Rio do Peixe, e de duas amostras de tufa carbonática (TCR e TFG), oriundas da Formação Jandaíra da Bacia Potiguar, tiveram suas velocidades elásticas medidas em laboratório e estimadas por simulação numérica a partir de modelos digitais.

Segundo Porto (2015), na amostra A7 13,6% dos grãos apresentam diâmetro de tamanho argila, 42,7% de tamanho silte e 43,7% equivale à classe das areias. Já na amostra A9 3,9% dos grãos são do tamanho argila, 10,5% silte e 85,6% dos grãos apresentam diâmetro correspondente à classe areia.

Ainda segundo Porto (2015), na amostra TCR aproximadamente metade dos grãos são de tamanho silte e a outra metade corresponde ao tamanho areia. Já na amostra TFG 11% dos grãos são de tamanho argila e 50,8% de tamanho areia. As amostras A7 e A9 são compostas em sua maior parte por quartzo, feldspato (anortita) e por outros minerais (traços de mica), enquanto a TCR apresenta matriz calcítica e a TFG matriz dolomítica.

Metodologia

As amostras de rocha utilizadas neste artigo foram coletadas em afloramentos e preparadas na forma de cilindros (plugues) com 1,5 polegada de diâmetro e cerca de 5 centímetros de comprimento para a realização dos ensaios de medição de velocidades em laboratório. Em seguida, de cada plugue foi extraída uma subamostra, com poucos milímetros de dimensão, as quais foram submetidas ao imageamento por microCT. A Figura 1 apresenta os plugues A7 e A9.

Os ensaios laboratoriais para medição das velocidades elásticas foram realizados no equipamento *Autolab 500*[®] (Figura 2), em amostras secas, com o sistema de pressão de poros aberto à pressão atmosférica, sob pressão confinante de 20 Mpa, e sob temperatura de 23 graus Celsius.

As imagens microtomográficas foram adquiridas utilizando o microtomógrafo *Skyscan 1173*[®] (Figura 3). As resoluções (tamanho de pixel) alcançadas em cada amostra são apresentadas na Tabela 1.

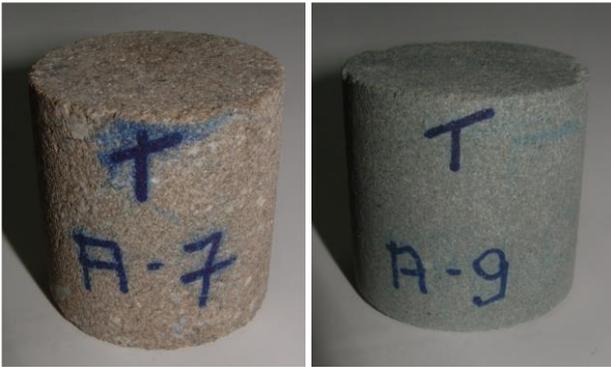


Figura 1 – Amostras de arenito A7 e A9.



Figura 2 – Equipamento *Autolab 500*[®] utilizado para a medição convencional das velocidades elásticas.

Para gerar as amostras 3D, foram escolhidas 300 imagens (de um total de 2014 *slices*) da parte mais interna da amostra, a fim de evitar problemas de borda. Foram utilizados dois softwares para realizar os ensaios

computacionais. Utilizou-se o *Avizo Fire*[®] para gerar as malhas (modelos digitais) que foram importadas para o *Comsol Multiphysics*[®], o qual foi utilizado para a simulação de propagação das ondas P e S.



Figura 3 – Microtomógrafo *Skyscan 1173*[®].

Tabela 1 – Resoluções alcançadas no imageamento por microCT.

Amostra	Resolução (μm)
A7	2,6
A9	3,0
TFG	2,6
TCR	5,0

Para gerar a malha de uma amostra primeiro foi aplicada a ferramenta *edit new label field*, para segmentar as imagens nas fases poro e matriz mineral. Finalizando a segmentação, utilizou-se o comando *remove islands* e *smooth labels*. O primeiro tem por objetivo remover possíveis ruídos existentes nas imagens, e o segundo, visa simplificar o modelo por meio da suavização das porções angulosas das imagens.

Após finalizar a segmentação, foi aplicado à imagem o comando *generate surface* para gerar uma superfície 3D. A princípio, as superfícies geradas apresentavam entre 2 e 3 milhões de faces, a depender da amostra em estudo, sendo necessárias simplificações das superfícies para otimizar os tempos de processamento dos ensaios. Com esse fim, foi utilizado o *simplification editor*, sugerindo um número aproximado de 25 mil faces, *max dist* de 20 e *min dist* de 15. Este procedimento de simplificação gerou malhas que variaram entre 90 mil e 103 mil faces, dependendo da dimensão e do nível de complexidade de cada subamostra.

A simplificação do modelo gera, às vezes, falhas de interseção das faces dos tetraedros e/ou um aumento exagerado da razão de aspecto dos tetraedros, reduzindo a qualidade dos tetraedros. Para que seja possível gerar a malha é necessário que não haja interseções nem faces com orientação errada, ou razões de aspecto

exageradas. Neste trabalho foram aceitas razões de aspecto menores que 20.

Para se corrigir as interseções, acessa-se o menu *surface editor*, localizado no arquivo de superfície gerado pelo *generate surface*. Em seguida, foi realizado o *intersections test*, para verificar a existência e localização das interseções. Por fim, estas foram corrigidas por meio das ferramentas manuais de edição.

Aplica-se o *aspect ratio test* para verificar em quais faces se encontram razões de aspecto maiores que 20. Para corrigir tais erros, existem as ferramentas automáticas *fix tetra quality* e *prepare generate tetra grid*. Ao final do procedimento automático ocorreram melhoras das razões de aspecto, porém muitas vezes ainda não atingindo os valores necessários. Assim, por fim, as faces eram corrigidas por meio das ferramentas de edição manual.

Para finalizar a edição da malha aplica-se o *tetra quality test*, aplicando as correções automáticas e manuais até que a razão de aspecto e a qualidade dos tetraedros atinjam valores abaixo de 20.

Depois de editada, a malha é gerada por meio do comando *generate tetra grid* e salva em formato *Bulk Data Format* (BDF). A Figura 4 mostra um exemplo de malha gerada (subamostra TCR) onde a fração verde representa a matriz rochosa e a fração bege representa os poros da rocha. As malhas assim geradas foram importadas pelo *Comsol Multiphysics*[®] e submetidas aos ensaios de simulação de propagação de ondas.

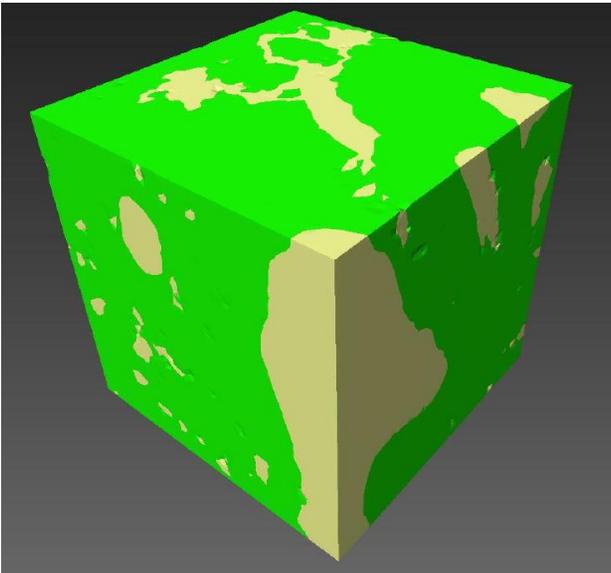


Figura 4 – Malha gerada para a subamostra TCR.

A simulação da propagação de ondas P e S foi realizada através da aplicação do módulo *solid mechanics* da sessão *Structural Mechanics*, e do módulo *Pressure Acoustics* do *Comsol*. Este módulo permite a análise transiente da propagação de ondas em maciços rochosos causada pela aplicação de uma carga explosiva de curta duração.

Este modelo matemático utiliza três ferramentas do *Solid Mechanics: Symmetry*, na qual selecionam-se as faces

da amostra para informar ao programa a simetria da amostra; *Boundary Load*, que indica a face a partir da qual a onda vai se propagar; *Low-Reflecting Boundary*, que faz com que a onda que chega na face oposta à de partida tenha uma baixa reflexão (impedindo que a reflexão da mesma interfira no tempo de chegada das ondas seguintes). Utiliza ainda a ferramenta *Pressure* do módulo *Pressure Acoustics*, a partir da qual se informa ao programa a equação do pulso inicial de pressão acústica.

Para simular a velocidade de propagação das ondas de corpo, o programa foi alimentado com valores dos módulos elásticos dos materiais utilizados como arcabouço mineral e fluido saturante.

Depois de processado, o programa fornece o valor da velocidade de propagação da onda (P e/ou S) em qualquer ponto da malha. Para calcular a velocidade gera-se um histograma que faz a leitura de todos os pontos presentes na malha, viabilizando o cálculo da velocidade média para a amostra. A Figura 5 apresenta um mapa tridimensional da distribuição espacial dos valores de velocidade da onda S na subamostra A7.

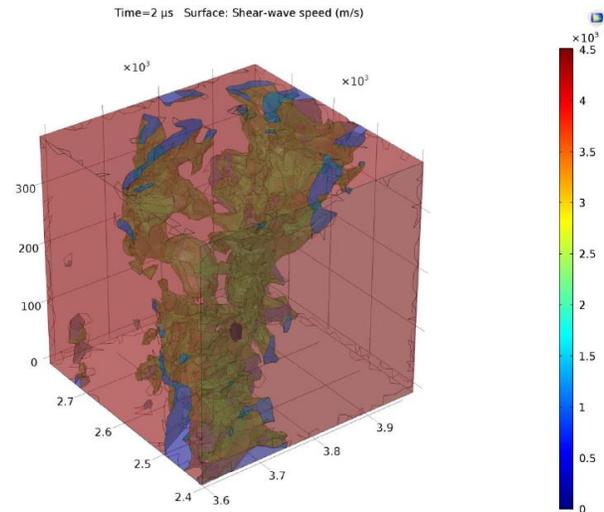


Figura 5 – Distribuição de valores de velocidade da onda S na subamostra A7.

Resultados e discussões

A Tabela 2 apresenta as velocidades das ondas P e S medidas de forma convencional nas amostras e os valores destas velocidades estimados por simulação numérica nos correspondentes modelos digitais, além dos respectivos desvios em relação às velocidades medidas convencionalmente.

Conforme relatado na literatura (Andrä *et al.*, 2013), as velocidades elásticas estimadas em modelos digitais de rochas tendem a ser maiores do que as medidas de forma convencional em laboratório. No entanto, neste trabalho, embora as velocidades estimadas numericamente também tenham sido maiores do que as medidas, os desvios registrados ficaram muito próximos dos níveis de erro aceitáveis para as medições convencionais de velocidades elásticas em rochas. De

acordo com práticas laboratoriais correntes, considera-se aceitável um erro de $\pm 2\%$ na medição da VP e um erro de $\pm 4\%$ na medição da VS. Desta forma, as velocidades elásticas estimadas numericamente podem ser consideradas aceitáveis para as amostras analisadas.

Tabela 2 – Velocidades das ondas P e S medidas de forma convencional, estimadas numericamente em modelos digitais, e respectivos desvios.

Amostra	VP (m/s)			VS (m/s)		
	Conv.	Digital	Desvio (%)	Conv.	Digital	Desvio (%)
A7	3786	3863	2,0	2341	2363	0,9
A9	3319	3392	2,2	2035	2104	3,4
TFG	5898	6026	2,2	2984	3062	2,6
TCR	4490	4616	2,8	2362	2382	0,8

Outro aspecto relevante da simulação numérica é que ela fornece a distribuição tridimensional das velocidades elásticas, conforme visto na Figura 5, e não apenas um único valor de velocidade para toda a amostra, como ocorre nos ensaios convencionais. Isto permite investigar a influência de estruturas internas da amostra (tais como fissuras, poros vulgares e qualidade de contatos entre grãos) sobre as suas velocidades elásticas.

Conclusões

Neste artigo foram apresentados resultados referentes à simulação numérica da propagação de ondas elásticas compressoriais e cisalhantes em modelos digitais de rocha siliciclásticas e carbonáticas. Tais modelos digitais foram construídos a partir de imagens reais obtidas por microtomografia de raios x de subamostras extraídas de amostras de rocha cujas velocidades elásticas foram medidas em ensaios laboratoriais pelo método convencional da propagação de pulsos ultrasônicos. As velocidades estimadas pela simulação numérica foram um pouco superiores às velocidades medidas laboratorialmente, mas dentro da faixa de precisão aceitável para as medições laboratoriais. Portanto, as velocidades simuladas podem ser consideradas aceitáveis. Adicionalmente, as simulações fornecem uma imagem da distribuição tridimensional das velocidades elásticas no interior das subamostras de rocha, o que permite uma investigação precisa da influência de estruturas internas da rocha que afetam as velocidades de propagação das ondas elásticas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao convênio Nº 0050.0094707.14.9 firmado entre a UFCG e a PETROBRAS cujos recursos permitiram a realização desta pesquisa.

Referências

- ANDRÄ, H.; COMBARET, N.; DVORKIN, J.; GLATT, E.; HAN, J.; KABEL, M.; KEEHM, Y.; KRZIKALLA, F.; LEE, M.; MADONNA, C.; MARSH, M.; MUKERJI, T.; SAENGER, E.H.; SAIN, R.; SAXENA, N.; RICKER, S.; WIEGMANN, A.; XIN ZHAN, X. (2013). Digital rock physics benchmarks - part II: Computing effective properties. *Computers & Geosciences*, 50, 33 - 43.
- APOLINÁRIO, F. O. (2016). Influência da saturação fluida nas propriedades elásticas de rochas carbonáticas. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande.
- AVSETH, P.; MUKERJI, T.; MAVKO, G. (2005). Quantitative seismic interpretation: Applying rock physics tools to reduce interpretation risk. Cambridge University Press, 359 pp.
- BOURBIÉ, T.; COUSSY, O.; ZINSZNER, B. (1987). *Acoustics of Porous Media*. Éditions Technip, 334 p.
- DVORKIN, J.; DERZHI, N.; DIAZ, E.; FANG, Q. (2011). Relevance of computational rock physics. *Geophysics*, vol. 76, nº 5.
- KNACKSTEDT, M.A.; LATHAM, S.; MADADI, M.; SHEPPARD, A.; VARSLOT, T.; ARNS, C. (2009). Digital rock physics: 3D imaging of core material and correlations to acoustic flow properties. *The Leading Edge*, January.
- MAVKO, G.; MUKERJI, T.; DVORKIN, J. (2009). *The Rock Physics Handbook. Tools for seismic analysis in porous media*. Cambridge University Press.
- MEDEIROS, L.C.; SOARES, J.A. (2012). Petrofísica computacional aplicada. V Simpósio Brasileiro de Geofísica, Rio de Janeiro.
- PORTO, A. L. (2015). Estimção de propriedades petrofísicas de rochas sedimentares a partir de imagens microtomográficas de raios x. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande.
- YILMAZ, O. (2001). *Seismic Data Analysis – Processing, inversion and interpretation of seismic data*. Vols. I and II. 2nd Edition. Society of Exploration Geophysicists, 2027 pp.