Estudo experimental dos efeitos da variação de pressão e do fluido na velocidade e atenuação de ondas sísmicas em rochas carbonáticas

Dourival Edgar dos Santos Júnior[1,3], Sérgio Adriano Moura Oliveira[1,2,3], Antônio Romero da costa Pinheiro[1,3,4] e Fernando Sérgio de Moraes[1,2,3].
[1]GIR/LENEP/UENF,[2] Invision Geophysics, [3]INCT-GP e [4]UFAC

Copyright 2024, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no IX Simpósio Brasileiro de Geofísica, Salvador, 08 a 10 de outubro de 2024. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do X 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 apresentamos os resultados de medidas de velocidade e atenuação de ondas sísmicas P e S realizadas em amostras de rochas carbonáticas obtidas de afloramentos da bacia de Sergipe-Alagoas. Tais medidas foram obtidas a partir de experimentos laboratoriais utilizando frequências ultrassônicas, sendo que as amostras de rochas foram submetidas a variação de pressão no regime seco e saturado com água.

Introdução

Nos últimos anos, houve uma extensa exploração de reservatórios carbonáticos que possuem abundantes recursos petrolíferos. Esses reservatórios apresentam uma composição mineral complexa e distribuições espaciais não uniformes, especialmente no que diz respeito ao armazenamento (volume de poros) e à permeabilidade (Xu & Payne, 2009). Essa considerável heterogeneidade tem dificultado a aplicação de métodos geofísicos convencionais para identificar áreas ideais de exploração de petróleo e gás. Em particular, o impacto da pressão e da saturação é significativo.

Estudos experimentais e teóricos indicaram que as condições de pressão e saturação têm impactos significativos na velocidade e na atenuação das ondas (Borgomano et al., 2019). Chapman et al. (2016) mediram e analisaram a atenuação sísmica de arenitos Berea sob diferentes pressões confinantes e demonstraram que essa propriedade é influenciada pelo fluxo de fluido poroso em escalas mesoscópicas (a heterogeneidade simulada é muito maior que o tamanho do grão mineral, mas menor que o comprimento de onda sísmico). Todos esses estudos evidenciaram que a velocidade e a atenuação das ondas estão relacionadas às condições de pressão, bem como às propriedades do fluido nos poros.

Wanniarachchi et. al (2017) conduziram um estudo experimental sobre as propriedades dinâmicas das rochas usando atenuação de ondas sísmicas. Neste trabalho os autores realizam simulações em cinco amostras diferentes de rochas (arenito australiano, arenito indiano, xisto, siltito e granito). Com base nas propriedades físicas e nas velocidades das ondas sísmicas que se propagaram nestas rochas os autores realizaram modelagem matemáticas para determinar os módulos de elasticidade e volume e o coeficiente de Poisson das rochas encontrando resultados compatíveis com os obtidos por Toksöz et al. (1979) e Yale (1994). Os autores concluem que o valor da atenuação é 22% maior na amostra de granito comparada as amostras de arenito.

Recentemente Ruan et al. (2023) realizaram experimentos em seis amostras de rochas (dolomita) saturadas de água estudando os efeitos da temperatura e pressão na velocidade e atenuação. Os autores concluem neste estudo que para pressões efetivas menores que 40MPa as velocidades da onda P crescem não-linearmente com a pressão enquanto que a atenuação diminui gradualmente e também que a velocidade da onda P diminui com a porosidade enquanto que a atenuação aumenta. Os autores também propõem um modelo teórico com base nos modelos de Biot-Rayleigh (Ba et al. 2011) e Gurevich (Gurevich et al. 2010) para descrever a dissipação de energia causada por mecanismo de fluxo de fluido e meio poroso.

Metodologia

O método utilizado para se obter informações de parâmetros elásticos das amostras de rochas em estudo consistiu no ensaio de transmissão de onda ultrassônica. Este teste não destrutivo é realizado através de um transdutor piezoelétrico que gera um pulso sísmico em uma face da amostra de rocha e outro transdutor que registra a forma de onda na outra extremidade da amostra. Os ensaios foram realizados com o equipamento Sistema de física de Rocha (ErgoTech), localizado no Laboratório de Física e Deformações de rochas do Laboratório de Engenharia e Exploração de Petróleo – LENEP/UENF. A Figura (1) mostra o sistema utilizado para realizar as medidas de propriedades estáticas e dinâmicas. Este sistema consiste em um suporte de core holder triaxial (Hoek-Franklyn) que permite a pressão de confinamento radial por meio de bombeamento hidráulico de óleo de silício em torno de um plugue revestido. A compressão axial também pode ser aplicada por um pistão que move uma placa em direção à base do plugue. A parte superior do plugue move outra placa puxando-a contra outra parte fixa da plataforma, desta forma, o movimento compressivo permite o carregamento axial. Transdutores de pressão são usados para medir a pressão radial, enquanto uma célula de carga é usada para medir a força na qual a amostra de rocha é submetida. Também são utilizados transdutores de deslocamento, como os Transformadores Diferenciais de Variáveis Lineares (LVDT) que medem a deflexão axial, além de um transdutor cantilever que

fornece a deflexão radial. Essas deflexões são medidas a uma taxa de amostragem de 20 Hz e são usadas para calcular a deformação axial e radial para cada estágio de pressão.

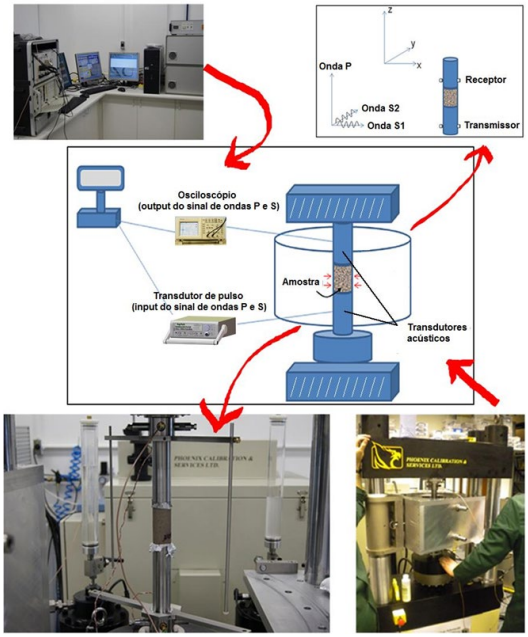

Figura 1 – Ilustração do experimento para determinação da velocidade de propagação e fator de qualidade de amostras de rochas.

A medição do tempo de chegada do pulso permite saber qual a velocidade de propagação da onda elástica na rocha. Para determinação do fator de qualidade foi utilizado o método da razão espectral, que é o método mais utilizado para medir a atenuação da forma de onda do pulso transmitido em experimentos de laboratório usando altas frequências (Kuster e Toksoz, 1974). Este método compara o espectro de amplitude de um pulso propagado em uma amostra de referência, onde o fator de qualidade Q1 é conhecido, com o espectro de amplitude do pulso propagado em uma amostra experimental de rocha, onde o fator de qualidade Q2 é desconhecido. As amostras devem ter as mesmas dimensões e o mesmo pulso de excitação $W(t)$ deve ser utilizado para ambas. A seguir apresentamos uma breve descrição matemática do método.

A expressão matemática para uma onda plana harmônica com frequência f propagando-se através da amostra de referência é

$$S_1(x,f) = AW(f)\, e^{-\alpha_1 x} e^{-i\left(2\pi f t - k_1 x\right)}, \qquad (1)$$

e a expressão matemática para uma onda plana harmônica com frequência f propagando-se através da amostra de rocha experimental é

$$S_2(x,f) = BW(f)\, e^{-\alpha_2 x} e^{-i\left(2\pi f t - k_2 x\right)}. \qquad (2)$$

Onde A e B são fatores de amplitude, $W(f)$ é a função espectral (transformada de Fourier) do pulso propagado, o número de onda k depende da frequência e da velocidade da onda v nas amostras:

$$k_{1,2} = \frac{2\pi f}{v_{1,2}}, \qquad (3)$$

e o coeficiente de atenuação é assumido como uma função linear da frequência:

$$\alpha_{1,2} = \frac{\pi f}{Q_{1,2} v_{1,2}}. \qquad (4)$$

Para obter Q_2 temos que obter a transformada de Fourier das formas de onda do pulso transmitidas na amostra de rocha de referência e experimental para obter S_1 e S_2 e então tomar o logaritmo da razão de seus espectros de amplitude:

$$\ln\left(\frac{|S_1|}{|S_2|}\right) = \left(\frac{\pi}{v_2 Q_2} - \frac{\pi}{v_1 Q_1}\right) x f + \ln\left(\frac{A}{B}\right) \qquad (5)$$

Se o fator de qualidade Q_1 da amostra de referência for muito maior que o da amostra experimental, podemos simplificar a equação (5):

$$\ln\left(\frac{|S_1|}{|S_2|}\right) = \frac{\pi x}{v_2 Q_2} f + \ln\left(\frac{A}{B}\right) \qquad (6)$$

Esta razão espectral logarítmica é uma função linear da frequência f, cujo coeficiente angular é:

$$a = \frac{\pi x}{v_2 Q_2} \qquad (7)$$

Este coeficiente angular pode ser obtido ajustando uma função linear aos pontos experimentais de razão espectral usando mínimos quadrados. A velocidade v2 pode ser obtida a partir do tempo de viagem τ do pulso transmitido, então Q_2 pode ser finalmente obtido pela expressão abaixo:

$$Q_2 = \frac{\tau \pi}{a} \qquad (8)$$

Resultados

Neste estudo foram utilizadas cinco amostras de rochas coletadas do intervalo carbonático aflorante da bacia de

Sergipe-Alagoas (formação Riachuelo – membro Maruim). A seleção das amostras foi baseada nas condições de integridade física e geométrica das mesmas, visando a confiabilidade das medidas experimentais. As amostras também foram submetidas a caracterização petrográfica e da composição química e mineral. O intervalo de pressão axial a qual as mostras foram submetidas foi de 10 a 25 Mega Pascal, variando a um intervalo de 2,5 MPa. Decidiu-se não submeter as amostras a pressões maiores devido a estas serem rochas que passaram um longo período expostas a intempéries. A cada patamar de pressão foram registrados os sinais de onda P e onda S. Este experimento foi realizado para amostras secas e depois repetido quando estas foram saturadas com água.

A figura 2 mostra as formas de onda registradas na amostra de referência (alumínio) e na amostra 4A4na condição seca. Observa-se que o sinal experimental possui maior tempo de chegada e uma característica oscilatória de baixa frequência que se prolonga após a chega do pulso principal. Esta parte do sinal é conhecida como coda e é originada pelo retro espalhamento do pulso transmitido nas heterogeneidades internas da amostra. Os sinais devem ser janelados para evitar que as reverberações e a coda acabem influenciando os espectros de amplitudes.

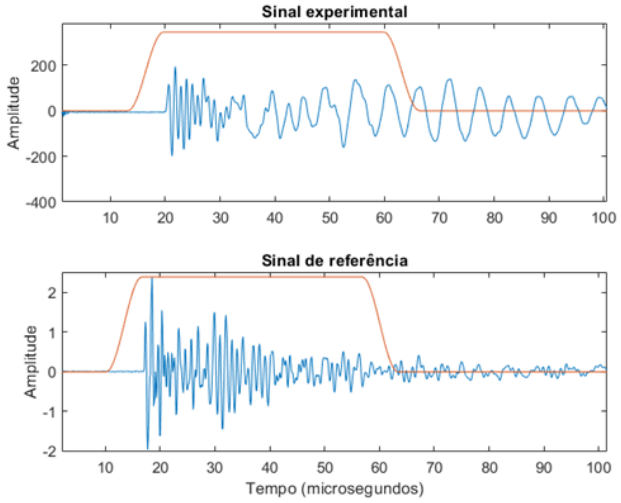

Figura 2 – Sinais registrados na amostra experimental e na amostra padrão de alumínio, com função de janelamento plotada em vermelho.

Observa-se na figura 3 que a energia do sinal experimental ocupa a banda de frequência que vai de 0.3 a 1.8 MHZ, possuindo um decaimento muito forte entre 1 e 1,8 MH, o que pode ser atribuído ao efeito da atenuação alta. Este decaimento é muito mais suave no espectro de amplitude do pulso transmitido na amostra de alumínio, visto que este material atenua muito pouco a onda. A figura 4 mostra o gráfico da razão espectral e a reta ajustada por mínimos quadrados, bem como o intervalo de 95% de predição. Embora o comportamento real da razão espectral (pontos azuis) não seja exatamente linear, como previsto teoricamente, ele se ajusta razoavelmente bem a este modelo. O valor do fator Q pode variar em função da banda de frequência selecionada para o ajuste da reta aos valores da razão espectral. Neste trabalho foi escolhido a banda de 0.3 a 1.8 MHZ, pois esta contém a energia tanto do sinal de referência, quanto do sinal registrado na amostra experimental.

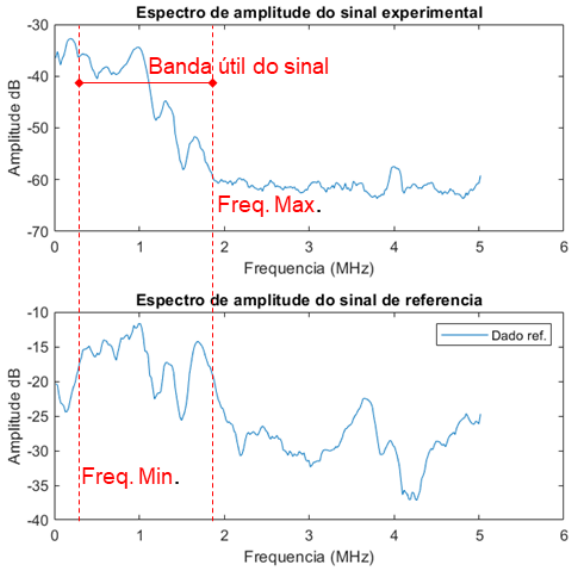

Figura 3 – Espectros de amplitude dos sinais registrados na amostra experimental e na amostra padrão de alumínio.

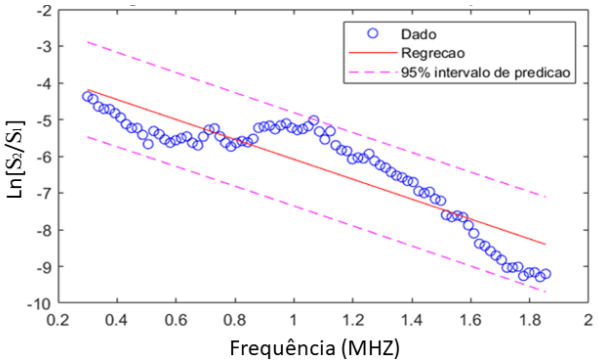

Figura 4 – Gráfico do ajuste de uma função linear aos valores obtidos da razão espectral.

Os resultados das medidas de velocidade e atenuação da onda P, para as amostras secas e saturadas, são exibidos na figura 5. Um gráfico similar para as medidas de onda S é exibido na figura 6. As medidas das velocidades e dos fatores de qualidade são plotadas junto com a barra vertical que representa a estimativa do erro experimental.

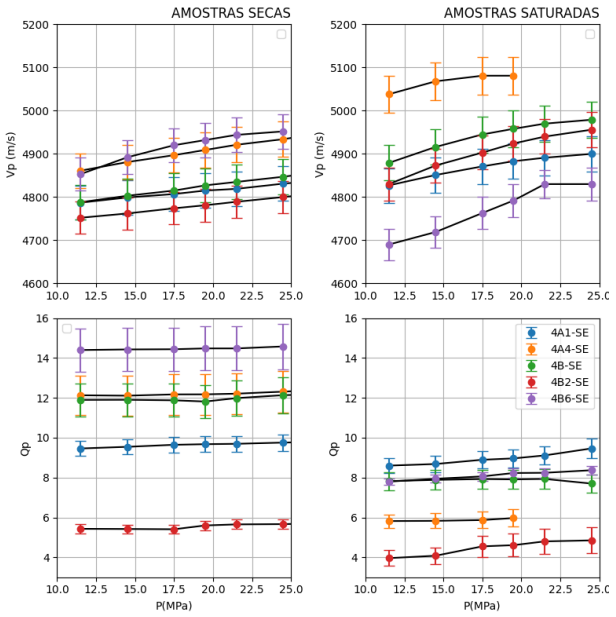

Figura 5 – Gráficos de Vp e Qp versus pressão axial para amostras secas e saturadas.

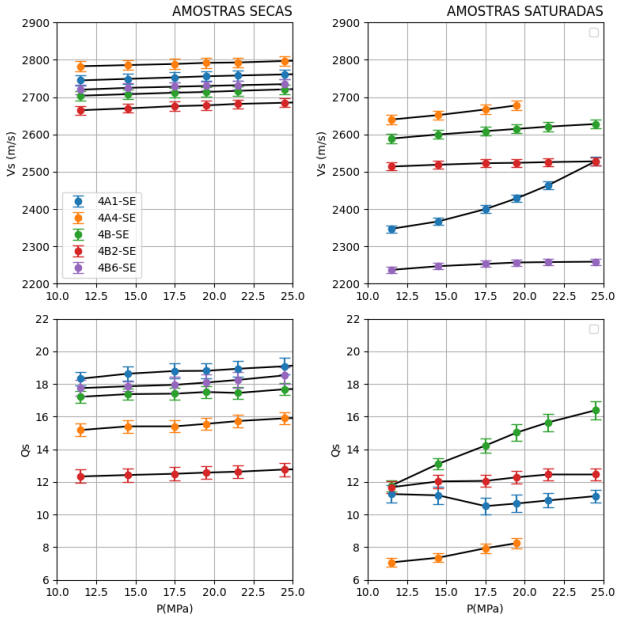

Figura 6 – Gráficos de Vs e Qs versus pressão axial para amostras secas e saturadas.

Discussão e Conclusões

Os resultados das medidas de velocidade e atenuação realizadas nas cinco amostras de rocha carbonática indicam uma tendência de aumento da velocidade da onda P e também da onda S com relação ao aumento da pressão axial, sendo que esta tendência de aumento é bem mais discreta para onda S do que para onda tipo P, tanto no caso das rochas seca, como saturadas com água. A velocidade da onda P tende a aumentar quando as amostras são saturadas e o contrário acontece com a velocidade de onda S, que é maior nas amostras secas do que saturadas, contudo, é possível observar que a sensibilidade de Vs com relação a pressão aumenta quando as rochas são saturadas. A atenuação sofrida pelas ondas ao se propagarem pelas as amostras, medidas pelo fator de qualidade, se mantém praticamente constante com a pressão axial aplicada no caso das rochas secas, tanto para onda P como S. Para as amostras saturadas observa-se uma tendência geral de aumento do fator Q_P e Q_S com a pressão, o que indica que a onda é menos atenuada neste caso. Os estudos agora seguem para o entendimento dos comportamentos observados à luz dos modelos de física de rocha tradicionais propostos na literatura.

Agradecimentos

Agradecemos a Petrobras pelo apoio financeiro para realização desta pesquisa, realizada no âmbito do projeto “Determinação de características petrofísicas de reservatório, a partir da resistividade espectral de testemunhos de bacias petrolíferas de reservatórios análogos de amostras sintéticas e amostras padrão”, SIGITEC 2018/00345-1. Dourival Edgar dos Santos Júnior agradece ao INCT-GP pela Bolsa de pesquisa concedida.

Referências

G. T. Kuster and Toksoz M. N., 1974, Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media: part II. Experimental results. Geophysics v.39 p.607-618.

Gurevich, B., Makarynska, D., Paula, O.B. & Pervukhina, M., 2010. A simple model for squirt-flow dispersion and attenuation in fluid-saturated granular rocks. Geophysics, 75, N109–N120.

Kansas. In SPE Mid-Continent Gas Symposium, 22–24 May, 1994. Amarillo, TX: Society of Petroleum Engineers.

Ba, J., Carcione, J.M. & Nie, J.X., 2011. Biot-Rayleigh theory of wave propagation in double-porosity media. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 116, B06202.

Wanniarachchi WAM, Ranjith PG, Perera MSA, Rathnaweera TD, Lyu Q, Mahanta B. 2017 Assessment of dynamic material properties of intact rocks using seismic wave attenuation: an experimental study.R. Soc. open sci. 4: 170896. http://dx.doi.org/10.1098/rsos.170896

Yale D. 1994 Static and dynamic rock mechanical properties in the Hugoton and Panoma fields, In SPE Mid-Continent Gas Symposium, 22–24 May, 1994. Amarillo, TX: Society of Petroleum Engineers.