



MEDIDAS DE VELOCIDADES COMPRESSIONAIS E CISALHANTES DE AMOSTRAS DE ROCHA DO CAMPO TUPI, BACIA DE SANTOS

Palavras-Chave: Ondas Ultrassônicas, Velocidade, Carbonatos.

Autores:

PEDRO DIAS ANTUNES (IG/UNICAMP)

Prof. Dr. EMILSON PEREIRA LEITE (orientador) (IG/UNICAMP)

1. INTRODUÇÃO

Desde o início da aquisição de dados sísmicos na Bacia de Santos no final da década de 60, o avanço de exploração tem sido crescente. Desde 2006, a grande descoberta mundial de reservatórios de hidrocarbonetos em águas ultra profundas e distante do ambiente continental em rochas carbonáticas na Bacia de Santos, os desafios técnicos, científicos e exploratórios aumentaram. Segundo a Agência Nacional de Petróleo (ANP), em maio de 2022 o Campo Tupi seguiu como maior produtor de petróleo e gás do pré-sal, atingindo 790 MMbbl/d de petróleo e 37,8 MMm³/d de gás natural.

Dada as diferenças características das propriedades petrofísicas das rochas carbonáticas, derivados de processos deposicionais diferentes das rochas siliciclásticas, os reservatórios de hidrocarbonetos alojados nessa litologia, apresentam um caráter mais complexo. A heterogeneidade em toda extensão e dimensão desses reservatórios, dado aos diferentes processos digenéticos atuantes, é um grande desafio para

caracterização, modelagem e exploração (Mohriak et al., 2015).

A discussão sobre a relação física dos carbonatos com as velocidades ultrassônicas vem sendo discutido e levantado desde 1956 por Hamilton *et al.* Trabalhos propostos por Wang *et al.* (2011) e Dou *et al.* (2011), apresentaram dados e conclusões sobre a variação elásticas a depender das propriedades porosas das rochas carbonáticas. Portanto, os parâmetros ultrassônicos, como a velocidade das ondas compressãois (primárias) e cisalhantes (secundárias) na litologia, permite calibrar e aprimorar a modelagem física das rochas (Cataldo *et. al.*, 2022)

Neste contexto, o projeto tem como objetivo mensurar velocidades ultrassônicas em amostras de rochas sedimentares carbonáticas, para desenvolver uma metodologia simulando o estado *in situ* da rocha. As amostras correspondem a diferentes fácies carbonáticas, sendo proveniente do Campo Tupi, Bacia de Santos.

2. METODOLOGIA

A metodologia aplicada para mensurar as velocidades ultrassônicas é baseada em diferentes processos a depender da propriedade geométrica das amostras de carbonatos. As principais etapas do desenvolvimento dessa nova metodologia consistem em: i) identificação da fácies carbonática, geometria e montagem do equipamento; ii) medição dos parâmetros ultrassônicos sem e com confinamento e; iii) tratamento dos dados e análise comparativa dos parâmetros obtido com os fornecidos.

As amostras de rochas carbonáticas que estão sendo utilizadas e mesuradas são provenientes de um poço, localizado no Campo Tupi, Bacia de Santos, RJ, e pertencem à Petrobras, logo, elas são de domínio público. Até o momento, a medição contou com 10 plugues cilíndricos no total, os quais contemplam diferentes fácies carbonáticas.

A primeira etapa, a identificação da fácies carbonática, consiste em saber a quantidade de matriz na amostra e suas propriedades petrofísicas, aspectos importantes para entender a passagem das ondas ultrassônicas no material. A geometria da amostra é um importante fato dado ao modo de montagem no aparato experimental usado neste projeto. O fator determinante para o modo de montagem do aparato é o comprimento da amostra, com X diferentes montagens, os intervalos de comprimento são: i) 28 mm à 40 mm; ii) 33 mm à 45 mm; iii) 38 mm à 50 mm; vi) 63 mm à 75 mm; v) 94 mm à 75 mm. Na montagem

O aparato experimental consiste numa célula confinante, onde as amostras são isoladas e,

longitudinalmente, o isolamento é dado por dois cabeçotes de aço 304, sendo um de 132 mm (à esquerda) e um de 182 mm (à direita), independente do modo de montagem. Nas extremidades dos cabeçotes é posicionado os transdutores, um transmissor e um receptor, para a transmissão e captação das ondas ultrassônicas e medição delas no equipamento. Com as amostras posicionadas adequadamente, as medidas são realizadas em diferentes pressões, simulando a pressão *in situ* dos reservatórios em águas ultra profundas. A pressurização imposta sobre os plugues ocorreu sobre o intervalo de 0 psi à 6000 psi.

Na segunda etapa, a medição das velocidades ultrassônicas utiliza-se um equipamento portátil da SIUI, modelo Smartor – Digital Ultrasonic Flaw Detector. Os parâmetros foram definidos para determinar as velocidades em amostras de rocha, sendo eles: tensão de 100 v, Comp. Pulso 500 ns, frequência de 10 Hz, largura de banda do filtro digital de 0,5 ~ 10 MHz, sonda P1-24L e o atraso da sonda varia entre o aspecto medido, com 1,88 μ s para onda compressional e 1,44 μ s para onda cisalhante. No equipamento, para determinar a velocidade da onda é preciso saber o comprimento total da passagem de transição dela, sabido já pela primeira etapa (cabeçote + amostra + cabeçote).

Os dois parâmetros ultrassônicos medidos são as velocidades das ondas, a compressional (V_p) e cisalhante (V_s). A velocidade da onda V_p , corresponde ao primeiro *trend* e pico identificado no equipamento. A velocidade da onda V_s , dado ao confinamento da amostra e passagem da onda pelos diferentes materiais, o processo de medição

utilizado foi mais interpretativo, com o auxílio de cálculos sobre a sobreposição das ondas durante a transmissão. Desse modo, para determinar a velocidade de Vs, foi interpretado o pico de maior amplitude do segundo ou terceiro *trend* de onda.

A terceira etapa, com os dados de velocidade obtidos pelo equipamento, foram tratados a partir de cálculos de tempo e velocidade, dado a passagem contínua da onda sobre todo o comprimento longitudinal do aparato, como já mencionado. De início calcula o tempo total de ambas as ondas, Vp (Tp) e Vs (Ts) a partir do comprimento total (Lt) e da onda.

$$Tp = \frac{Lt}{Vp} \quad ; \quad Ts = \frac{Lt}{Vs}$$

Com o tempo total calculado para cada onda, calculou as ondas Vp (Vpr) e Vs (Vsr) diretamente da rocha, utilizando agora o comprimento da rocha (Lr), velocidades Vp (Vpa) e Vs (Vsa) do aço e o comprimento total dos cabeçotes (La).

$$Vpr = \frac{Lr}{Tp - \left(\frac{La}{Vpa}\right)} ; Vsr = \frac{Lr}{Ts - \left(\frac{La}{Vsa}\right)}$$

Os dados finais calculados, foram comparados com os dados de mensurados Vp e Vs das amostras diferentes pressões pela *The University of Oklahoma* (Tabela 1). A tabela 1 corresponde a um compilado de medidas, tratando apenas da pressão mínima e máxima as quais as amostras foram submetidas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os dados devidamente tratados, foram plotados em gráficos para melhor visualização da influência da evolução da pressurização. Partindo disso, comparamos com os dados fornecidos para desenvolver e aprimorar o método usado.

O gráfico 1, representando a onda Vpr nas amostras, demonstra valores mais altos as amostras F7996H e F1102H. A amostra F7996H, com pressão 0 psi, obteve 5715 m/s e, com pressão em 6000 psi, 6097 m/s. As medidas propostas foram de 6002 m/s para 250 psi e 6310 m/s para 600 psi. Na amostra F1105H, os valores calculados em 0 e 6000 psi foram de 5547 m/s e 5557 m/s, respectivamente. Já os propostos foram de 0 m/s para 250 psi e, 5627 m/s para 6000 psi. Dentre as amostras com valores mais alto, ocorre similaridade entre os valores calculados e propostos, com exceção da amostra F1102H em 250 psi.

As amostras com valores mais baixos correspondem a F6852 e F1946H. A partir dos calculas na amostra F6852H, em 0 e 6000 psi obteve, 30035 m/s e 3144 m/s, respectivamente. Nos valores fornecidos, na variação de pressão de 250 psi e 6000 psi, tem-se 0 m/s e 5106 m/s, respectivamente. No plugue F1946H os valores obtidos em 0 e 6000 psi foram de, 4312 m/s e 4556 m/s, respectivamente. Os valores fornecidos para a mesma amostra em 250 psi foi de 4675 m/s e em 6000psi foi de 4978. A amostra F6852H, possui

Medidas The University of Oklahoma											
Parâmetro	Pressão (psi)	F7996H	F6852H	F1946H	F1885H	F1727H	F1252H	F1102H	F1078H	F1030H	F1000V
Vp	250	6.002	0	4.675	5.49	4.964	5.526	0	6.069	5.392	0
	6000	6.31	5.106	4.978	5.553	5.638	5.783	5.627	6.293	5.534	5.431
Vs	250	3.277	0	0	3.318	2.717	3.146	3.351	3.473	0	0
	6000	3.429	2.932	3.023	3.455	2.874	3.228	3.396	3.525	3.195	3.139

Tabela 1- Medidas de Velocidades de Ondas Compressional (Vp) e Cisalhante (Vs) em amostras de rochas carbonáticas do pré-sal em diferentes pressões realizadas pela *The University of Oklahoma*.

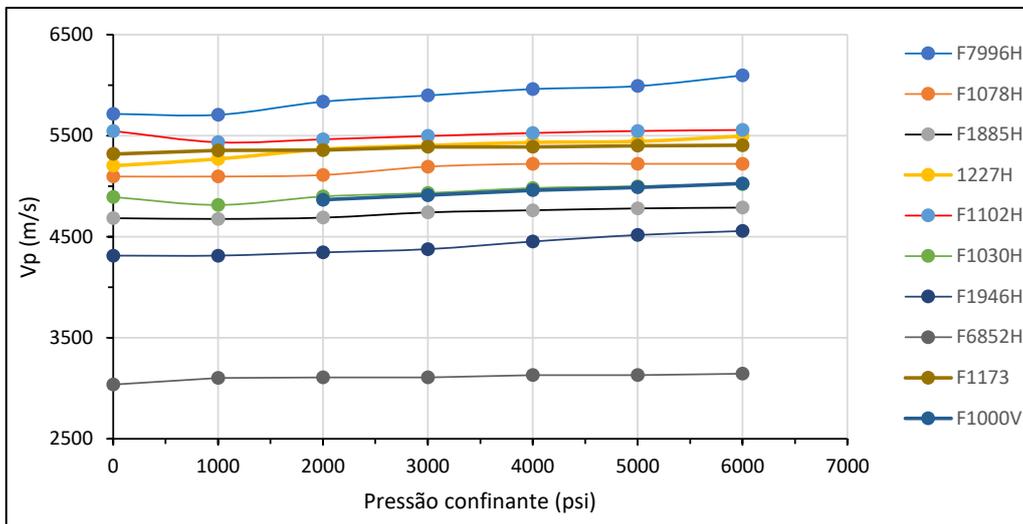


Gráfico 1 - Velocidade da onda compressional (Vp) em m/s de diferentes amostras carbonáticas submetidas a diferentes pressões (psi).

uma porosidade elevada e visível, o que indicaria a baixa velocidade da onda Vp quando compara as outras, porém os valores ainda possuem uma maior diferença entre o calculado e medido quando também comparado as outras amostras.

É apresentado no gráfico 2 a velocidade da onda Vp nas amostras calculadas. Os valores mais altos obtidos nesse parâmetro foram as amostras F100V e F1030H. A amostra F100V, na pressão 1000 psi, obteve 4163 m/se, e em 6000 psi, apresentou 4348 m/s. Não foi possível medir em 0 psi, dado ao grande ruído no sinal. Nos valore fornecidos em 250 psi e 6000 psi a velocidade

variou entre 0 m/s 3139 m/s. O plugue F1030H, nas pressões entre 0 e 6000 psi foi calculado as velocidades de 3208 m/s e 3418 m/s, respectivamente. As velocidades mensuradas fornecidas, entre 250 psi e 6000 psi, foram de 0 m/s a 3195 m/s. A velocidade 0 m/s fornecidas em 250 psi, pode ser associada ao ruído ou falta de precisão, visto que em alguns casos também não foi possível medir em pressões próximas de 0 psi.

As amostras com valores mais baixos apresentados foram as F7996H e 1078H. Apesar da amostra 1227H apresentar um dos menores valores, não foi considerada para a comparação visto que os

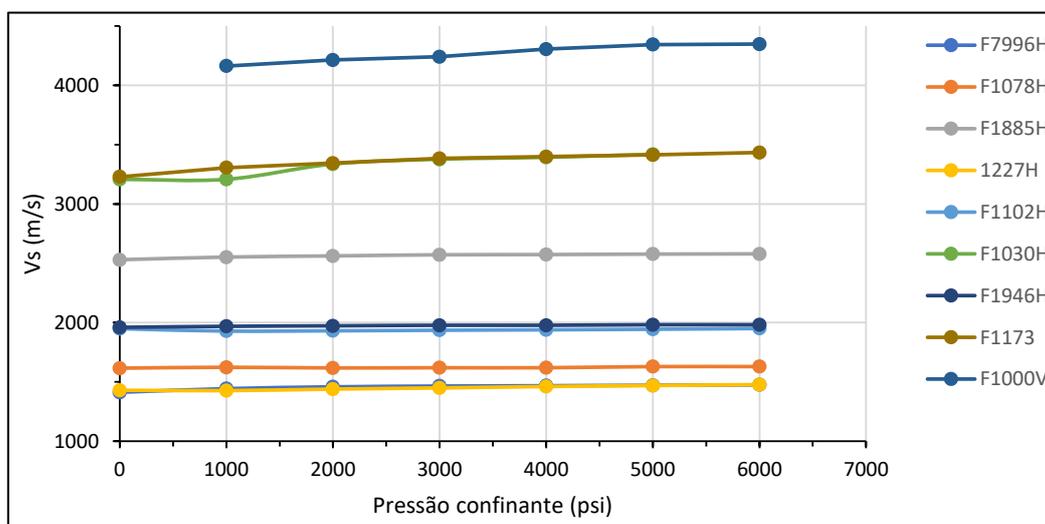


Gráfico 2 - Velocidade da onda cisalhante (Vs) em m/s de diferentes amostras carbonáticas submetidas a diferentes pressões (psi).

valores de V_p e V_s fornecidos eram iguais a 0 m/s. A velocidade da onda cisalhante calculada na amostra F7996H em 0 e 6000 psi foi de, 1412 m/s e 1475 m/s. As velocidades de V_s fornecidas em 250 psi e 6000 psi são de 3277 m/s e 3429 m/s, respectivamente. Na amostra F1078, foram calculados V_s em 0 psi, obtendo 1615 m/s, e 6000 psi, com 1628 m/s. Já nos valores de V_s fornecidos, em 250 psi e 6000 psi foram de 3473 m/s e 3525 m/s.

Apesar da maior discrepância entre os dados de V_s quando comparados, nota-se que os valores medidos diretamente na célula de confinamento, os valores apresentam maior similaridade. Nos valores medidos diretos, a variação ficou entre 3000 m/s e 4000 m/s, semelhante ao que foi fornecido pela *The University of Oklahoma*.

4. CONCLUSÃO

A caracterização das rochas reservatórios do pré-sal brasileiros por métodos que permitem um alcance maior é inegavelmente importante. O método de ondas ultrassônicas utilizado para caracterização das rochas vem sendo um grande fator de distinção das diferentes litologias.

As medidas de V_p se mostraram similares ao proposto pela *The University of Oklahoma*, o que podemos inferir uma boa associação entre as medidas. Em contrapartida, ainda há discussões sobre a medição das ondas V_s , dado a sua dificuldade interpretativa na nova metodologia proposto neste projeto. A medição isolada e

confinada será mais aprofundada para identificar e concluir um método técnico-científico mais preciso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). **Boletim Mensal de Produção de Petróleo e Gás Natural**. Disponível em:

<<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiZjZhZDliMTYtOWIyZi00OGY5LWJkYzItOTQ1MzFjZGMzMjMDNkIiwidCI6IjQ0OTlmNGZmLTI0YTtNGI0Mi1iN2VmLTEyNGFmY2FkYzIxMyJ9>>.

Cataldo R.A., Leite E.P., Rebelo T.B, More N.H.M.S., 2022. **Depth-variant pore type modeling in a pre-salt carbonate field offshore Brazil**. Journal Frontiers in Earth Science, Sec. Economic Geology Volume 10 – 2022.

Dou Q., Sun Y., Sullivan C., 2011. **Rock-physics-based carbonate pore type characterization and reservoir permeability heterogeneity evaluation, Upper San Andres reservoir, Permian Basin, west Texas**. J. Appl. Geophys. 74 (1), 8–18.

Hamilton E.L., Shumway G., Menard H.W., Shippek C.J. (1956). **Acoustic and other physical properties of shallow-water sediments off San Diego**. Journal of the Acoustical Society of America 28 (1), 1007–1011.

Mohriak W.U., Perdomo L.V., Plucenio D.M., Saad J.L., 2015. **Challenges for petrophysical characterization of pre-salt carbonate reservoirs**. 14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, pag. 623-627.

Wang, H., Sun, S. Z., Yang, H., Gao, H., Xiao, Y., and Hu, H. (2011). **The influence of pore structure on P- & S-wave velocities in complex carbonate reservoirs with secondary storage space**. Pet. Sci. 8, 394–405.