

## ESTUDO DE MODELOS ACÚSTICOS DE POÇOS PREENCHIDOS POR FLUIDOS PARA INVERSÃO DE PERMEABILIDADE UTILIZANDO ONDAS STONELEY

JACOB DANIEL DAROS<sup>1 2\*</sup>, GABRIEL VINICIUS VIAN<sup>3 2</sup>,

TOBIAS HEIMFARTH<sup>4 2</sup>

### 1 Introdução

Por intermédio da emissão de ondas acústicas em poços artesanais é possível determinar uma série de propriedades das formações rochosas os cercam, como a permeabilidade e porosidade, importantes na caracterização de reservatórios de hidrocarbonetos.

Esse método consiste na emissão de ondas por meio de uma ferramenta acústica cilíndrica no interior do poço (Figura 1). As perturbações emitidas se propagam pela formação rochosa, carregando informações sobre a mesma até o conjunto de detectores posicionados acima da fonte na mesma ferramenta.

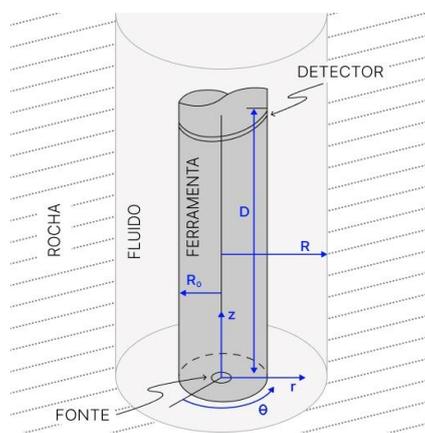


Figura 1: Diagrama da ferramenta de perfilagem dentro de um poço preenchido com fluido. Adaptada de Paillet e Cheng (2020).

A análise sônica é feita a partir de medidas de velocidades de propagação e atenuação de diferentes modos acústicos em função da frequência (curvas de dispersão), tais como modo cisalhante (onda S), modo compressional (onda P) e modos de interface poço-rocha, como os

<sup>1</sup> Licenciando em Física, Universidade Federal da Fronteira Sul, *campus Realeza*: jacob.daros@estudante.uffs.edu.br

<sup>2</sup> Grupo de Pesquisa: gpiFTA

<sup>3</sup> Mestrando em Física, Instituto de Física Teórica – UNESP: gabriel.vian@unesp.br.

<sup>4</sup> Prof. Doutor, Universidade Federal da Fronteira Sul, *campus Realeza*, contato: tobias.heimfarth@uffs.edu.br.

modos flexural e Stoneley (ver Figura 2). Essas curvas, quando contrastadas com um modelo físico do sistema, propiciam informações das propriedades das rochas, tais como a porosidade e a permeabilidade.

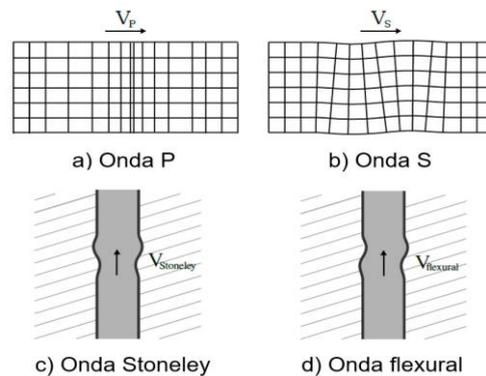


Figura 2: Ondas dos modos a) P (pressão); b) S (cisalhamento); c) Stoneley e d) Flexural.

## 2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo estudar modelos acústicos existentes para um sistema composto pela formação rochosa porosa na presença do poço preenchido por fluido, da ferramenta acústica e do reboco a fim de dar suporte teórico a implementação de métodos de inversão (método de obtenção dos parâmetros a partir dos dados experimentais).

## 3 Metodologia

No estudo dos modelos acústicos, a metodologia utilizada foi exploratória, realizando levantamentos bibliográficos e compilação, na forma de um texto, das informações presentes na literatura. Note que, embora a bibliografia sobre os fundamentos do tema seja em grande parte anterior a década de 90, existe uma carência de um material coerente e confiável.

Foram abordados conceitos fundamentais, como a equação da onda acústica em meios porosos, os efeitos de dispersão e absorção, bem como a interação das ondas com as estruturas presentes no interior dos poços. Após realizado desenvolvimento teórico do modelo, procedeu-se à implementação de um método de inversão computacional em Python, permitindo a obtenção de resultados quantitativos para dados experimentais.

## 4 Resultados e Discussão

Aplicando-se a equação da onda para meios elásticos, e as condições de contorno nas interfaces rocha/fluido e fluido/ferramenta (Figura 1) obtém-se um conjunto de equações acopladas para o stress radial, stress tangencial e deslocamento radial para cada meio de propagação. Este conjunto de equações pode ser escrito na forma matricial

$$\begin{pmatrix} \theta_{11} & \theta_{12} & \theta_{13} & 0 \\ \theta_{21} & \theta_{22} & \theta_{23} & 0 \\ 0 & \theta_{32} & \theta_{33} & \theta_{34} \\ 0 & \theta_{42} & \theta_{43} & \theta_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ D_1 \\ D_2 \\ A_4 \end{pmatrix} = 0,$$

onde os componentes da matriz da direita são constantes e os termos da matriz da esquerda são:

$$\theta_{11} = \frac{\omega^2}{2\kappa^2 V_S^2 - \omega^2} m_2 K_1(m_2 R),$$

$$\theta_{12} = -m_1 I_1(m_1 R)$$

$$\theta_{13} = m_1 K_1(m_1 R),$$

$$\theta_{21} = \rho_s \left\{ \frac{2\kappa^2 V_S^2 - \omega^2}{\omega^2} K_0(m_2 R) + \frac{2V_S^2 m_2 m_3 K_1(m_2 R)}{\omega^2 - 2\kappa^2 V_S^2} \left[ \frac{1}{m_3 R} + \frac{2\kappa^2 V_S^2 K_0(m_3 R)}{\omega^2 K_1(m_3 R)} \right] \right\},$$

$$\theta_{22} = \rho_f I_0(m_1 R),$$

$$\theta_{23} = \rho_f K_0(m_1 R),$$

$$\theta_{32} = m_1 I_1(m_1 R_0),$$

$$\theta_{33} = m_1 K_1(m_1 R_0),$$

$$\theta_{34} = \frac{\omega^2}{2\kappa^2 V_{St}^2 - \omega^2} m_4 K_1(m_4 R_0),$$

$$\theta_{42} = \rho_f I_0(m_1 R_0),$$

$$\theta_{43} = \rho_f K_0(m_1 R_0),$$

$$\theta_{44} = \rho_t \left\{ \frac{2\kappa^2 V_{St}^2 - \omega^2}{\omega^2} I_0(m_4 R_0) + \frac{2V_{St}^2 m_4 m_5 I_1(m_4 R_0)}{\omega^2 - 2\kappa^2 V_{St}^2} \left[ \frac{1}{m_5 R_0} + \frac{2\kappa^2 V_{St}^2 I_0(m_5 R_0)}{\omega^2 I_1(m_5 R_0)} \right] \right\}.$$

Os termos  $\theta_{ij}$  envolvem funções de Bessel e são funções de  $\omega$  e  $k$  (frequência angular e número de onda), velocidades P e S e das densidades dos meio. Para que haja solução não trivial o determinante da matriz deve ser nulo, e portanto somente há soluções para um conjunto reduzido de  $k_i(\omega)$ , os modos acústicos do sistema. Estas funções podem ser reescritas como  $v_i(f)$ , ou seja, a velocidade do modo em função da frequência ou curva de dispersão.

Foram utilizados dados acústicos de monopolo disponibilizado pela Agência Nacional de Petróleo (ANP), do projeto REATE, que podem ser vistos na Figura 4. Na base de dados também é possível se obter grande parte dos outros parâmetros de entrada do modelo, enquanto que os faltantes foram estimados de outras formas, por exemplo, assumindo a densidade da ferramenta como sendo a densidade do aço. Os parâmetros utilizados como entrada no modelo estão presentes na Tabela 1.

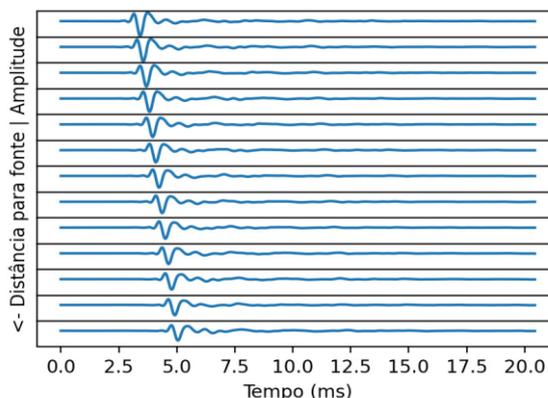


Figura 4: Dados experimentais – amplitude acústica em função do tempo medida para cada um dos 13 detectores regularmente espaçados na ferramenta.

Tabela 1: Parâmetros do poço.

Parâmetro	Valor
Velocidade da onda P no sólido ( $V_P$ )	4166 m/s
Velocidade da onda P na ferramenta ( $V_{Pt}$ )	5900 m/s
Velocidade da onda P no fluido ( $V_f$ )	1175 m/s
Velocidade da onda S no sólido ( $V_S$ )	2500 m/s
Velocidade da onda S na ferramenta ( $V_{St}$ )	3100 m/s
Raio do poço ( $R$ )	0.211540807898228 m
Raio da ferramenta ( $R_0$ )	0.10795 m
Densidade do sólido ( $\rho_S$ )	2480.92 Kg/m <sup>3</sup>
Densidade do fluido ( $\rho_f$ )	1300 Kg/m <sup>3</sup>
Densidade da ferramenta ( $\rho_t$ )	7800 Kg/m <sup>3</sup>

Fonte: Agência Nacional de Petróleo (2023).

Para a obtenção dos modos acústicos presentes nos dados experimentais, foi aplicado o método de semelhança espectral nos sinais da Figura 4, ou seja,

$$\rho(\omega, s) = \frac{\left| \sum_{n=1}^N X_n^*(\omega) z^{n-1} \right|}{\sqrt{N \sum_{n=1}^N X_n^*(\omega) X_n(\omega)}}$$

resultando no diagrama espectral da Figura 5, onde pode-se ver na região central de velocidades o modo Stoneley presente no sistema. A curva de dispersão teórica, dada pelo modelo, foi obtida por meio da matriz citada anteriormente, de onde foi calculado para quais valores de frequência e velocidade o determinante é igual a zero, resultando nos valores que correspondem com a linha tracejada no diagrama. Neste resultado, somente buscou-se validar o modelo acústico, de forma que o único parâmetro ajustado, por não estar disponíveis nos dados experimentais utilizados, foi a velocidade da onda P do fluido. Somente as raízes correspondentes ao modo

Stoneley estão representadas. Note que o modelo reproduz de forma bastante fiel os dados experimentais, indicando sua validade.

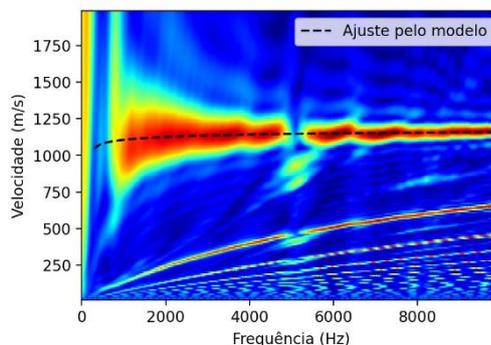


Figura 5: Diagrama da velocidade em função da frequência com ajuste do modelo teórico.

## 5 Conclusão

Nesse estudo, foi explorado e validado um modelo teórico para obtenção da curva de dispersão do modo Stoneley em poços preenchidos por fluido na presença de uma ferramenta acústica. O ajuste obtido pelo modelo acústico condiz com os dados apresentados pelo modelo de semelhança espectral.

## Referências Bibliográficas

KAUSEL, Eduardo. **Fundamental Solutions in Elastodynamics**. New York: Cambridge University Press, 2006.

PAILLET, Frederick L.; CHENG, Chuen Hon. **Acoustic waves in borehole**. New York: CRC Press, 2020.

RAETE Agencia Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis: **Banco de dados**. Disponível em: <https://reate.cprm.gov.br/anp/TERRESTRE>. Acesso em: 20 jul. 2023.

X.-M. Tang, C. H. A. Cheng, A. Cheng, **Quantitative borehole acoustic methods**, Vol. 24, Elsevier, 2004.

T. Lay, T. C. Wallace, **Modern Global Seismology**: Volume 58, illustrated edição Edition, Academic Press, San Diego, 1995.

**Palavras-chave:** Ondas acústicas, modelo físico, poço preenchido por fluido, ondas Stoneley, permeabilidade.

**Nº de Registro no sistema Prisma:** PES 2022 - 0189

**Financiamento:** Fundação Araucária.