

MODELAGEM ELETROSSÍSMICA EM MEIOS 1D

THALIA RODRIGUES PEREIRA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
LABORATÓRIO DE ENGENHARIA E EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO

MACAÉ - RJ
DEZEMBRO - 2021

MODELAGEM ELETROSSÍSMICA EM MEIOS 1D

THALIA RODRIGUES PEREIRA

Monografia apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para obtenção do título de Engenheira de Exploração e Produção de Petróleo.

Orientador: Viatcheslav Ivanovich Priimenko, Ph.D.

Co-orientadora: Marcia Miranda Azeredo, D.Sc.

MACAÉ - RJ

DEZEMBRO - 2021

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Escopo do Problema	1
1.2	Objetivos	3
2	Revisão Bibliográfica	4
3	Metodologia	7
3.1	Motivação Para o Tema	7
3.2	Classificação da Pesquisa	8
3.3	Simulação Computacional	10
	Referências	12

1 Introdução

Neste trabalho será desenvolvido um procedimento matemático-numérico para a análise do efeito eletrossísmico em meios 1D, isto é, os campos elétrico e magnético e os deslocamentos sólidos e fluidos dependem apenas de uma coordenada espacial e será considerado somente uma fonte externa eletromagnética. Além de realizar um estudo de propagação das ondas em meios elásticos e condutivos, considerando o processo de acoplamento através do efeito eletrocinético, a análise de atenuação e dispersão dessas ondas.

1.1 Escopo do Problema

A aplicação da geofísica permite o estudo do subsolo usando as medidas de suas propriedades físicas, assim como, adquirir, processar e interpretar os dados coletados por instrumentos especiais, com objetivo de obter informações sobre a estrutura e composição das rochas em subsuperfície. Os métodos geofísicos fazem parte de um conjunto de ferramentas investigativas indispensáveis à prospecção de óleo e gás, seja em qualquer nível de detalhe, ou econômico, desejável.

Dentre esses métodos o mais importante devido à quantidade de informação, a ampla área coletada e também na sua aplicação é o levantamento sísmico que fornece informações da geologia da subsuperfície. Na sísmica se estuda a estrutura da terra em dezenas de quilômetros, baseando-se em ondas elásticas que são refletidas e refratadas nas interfaces que separam as rochas de diferentes constituições petrofísicas (THOMAS, 2004).

O levantamento geofísico é dividido em dois tipos: os que fazem uso dos campos naturais da Terra, e aqueles que envolvem a aplicação na superfície de energia gerada artificialmente. O presente trabalho apresenta o segundo método, que envolve a geração de campos elétricos ou eletromagnéticos locais que possam ser usados de modo análogo ao dos campos naturais, ou, no mais importante grupo de

métodos de levantamento geofísico, a geração de ondas sísmicas, cuja velocidade de propagação e caminhos de transmissão através da subsuperfície são mapeados para fornecer informações sobre a distribuição dos limites geológicos em profundidade e são capazes de produzir um quadro mais detalhado e bem resolvido da geologia de subsuperfície (KEAREY, BROOKS, HILL, 2009).

Os métodos atuais de exploração em subsuperfície são baseados em princípios geofísicos sísmicos ou elétricos. O método sismoeletromagnético combina esses dois princípios, sísmica e os métodos eletromagnéticos aos fluidos, considerando somente como fonte externa uma fonte eletromagnética. Oferece uma caracterização da estrutura não invasiva da superfície terrestre, desde as primeiras centenas de metros até uma profundidade da ordem de 1000 m, em termos de fluidos (água, óleo, gás) (L. JOUNIAUX, F. ZYSERMAN, 2015).

A eletrossísmica é o método sismoeletromagnético que consiste em perturbações acústicas mensuráveis na superfície induzidas por campos eletromagnéticos. O sinal eletromagnético relacionado ao movimento relativo entre o fluido e a matriz da rocha é chamado de fenômeno eletrocinético. Em um meio poroso, a densidade de corrente elétrica, ligada aos íons dentro do fluido, é acoplada ao fluxo (Overbeek, 1952) de modo que os potenciais de fluxo são gerados por fluidos que se movem através desses tipos de meios (Jouniaux et al., 2009). Esse efeito está relacionado à existência de uma dupla camada elétrica entre a rocha e o fluido, desenvolvida no contato entre a parede do poro e o eletrólito. O fluxo de corrente, devido ao movimento da camada difusa, é induzido por uma diferença de pressão do fluido ao longo da interface.

De acordo com Priimenko e Vishnevskii (2008), são diversos os tipos de interações envolvendo campo elétrico, campo magnético e deslocamento de partículas de um corpo. Essas interações de campos eletromagnéticos com campos de deformações mecânicas em meios contínuos são descritos pela eletrodinâmica e pela poroelasticidade. O acoplamento eletrossísmico ocorre quando um meio poroelástico é submetido a um campo eletromagnético. Quando o efeito eletrocinético é induzido pela propagação das ondas sísmicas, o que leva a um movimento relativo entre fluido e a matriz da rocha, o coeficiente eletrocinético depende da frequência, assim como a permeabilidade dinâmica.

As equações que regem o fenômeno do acoplamento eletrocinético foram desenvolvidas por Pride (1994) que propôs um modelo matemático representado por um sistema de equações diferenciais parciais composto pelas equações de Biot (poroelasticidade) acopladas com as equações de Maxwell (eletromagnetismo). Ursin

(1983), em seu estudo, trata, de forma unificada, a propagação de ondas elásticas e eletromagnéticas em meios estratificados. A ideia é unir as equações que regem os fenômenos da propagação das ondas elásticas e eletromagnéticas, transformando as equações diferenciais parciais que modelam estes fenômenos em um sistema de equações diferenciais ordinárias de mesmo formato, denominado sistema do tipo Ursin. Os estudos realizados por White e Zhou (2006) mostraram que a propagação de ondas poroelásticas e eletromagnéticas acopladas pelo efeito eletrocinético em um meio estratificado podem ser tratados pelo formalismo de Ursin.

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é realizar uma simulação do modelo matemático relacionado com a propagação das ondas em meios elásticos e condutivos, considerando os processos de acoplamento, através do efeito eletrossísmico, destas ondas com o campo eletromagnético, realizando a análise de atenuação e dispersão das ondas.. E em seguida analisar a influência da variação dos parâmetros físicos e petrofísicos do meio na solução do problema.

Para alcançar o objetivo geral, busca-se atingir os seguintes objetivos específicos:

- Apresentar uma visão geral do efeito eletrossísmico;
- Realizar o desenvolvimento baseado na teoria das equações diferenciais, no método de Ursin e na linguagem MatLab;
- Realizar uma análise de dispersão e atenuação das ondas que governam o efeito eletrossísmico em meios 1D;
- Realizar uma análise de influência dos parâmetros petrofísicos na propagação das ondas elásticas e eletromagnéticas acopladas;
- Desenvolver um algoritmo numérico baseado no método de resolução criado;
- Criar um código computacional no ambiente MatLab capaz de obter a solução analítica-numérica do problema;
- Executar simulações da propagação dessas ondas em meios 1D, validando assim o desenvolvimento teórico realizado.

2 *Revisão Bibliográfica*

A interação eletrocinética, induzida pela perturbação do potencial eletrocinético, por meio da eletrossísmica, vem sendo observada em laboratório e em campo por muitos anos, Thompson (1936) e Ivanov (1939).

Frenkel (1944) foi o primeiro a observar a teoria dos fenômenos eletrossísmicos. Ele postulou equações que descrevem o fluxo relativo de fluido-sólido induzido por uma onda sísmica. Considerou os campos elétricos induzidos pelo fluxo de fluido, empregando a equação de Helmholtz-Smoluchowski. Esta equação não considera a geração de ondas eletromagnéticas nas interfaces (a resposta da interface), permite apenas os campos elétricos cossísmicos. Uma vez que a equação de Helmholtz-Smoluchowski considera apenas os campos elétricos causados por gradientes de pressão, ela falha em levar em consideração a conversão de energia eletrossísmica associada às ondas de cisalhamento.

Os fenômenos eletrossísmicos estão associados ao fluxo relativo de fluido-sólido causado por ondas sísmicas. A teoria da propagação de ondas sísmicas em meios porosos saturados, desenvolvida por Maurice A. Biot (Biot, 1956a, 1956b, 1962a, 1962b) pode ser vista como a próxima etapa no desenvolvimento da teoria eletrossísmica. De acordo com a teoria de Biot, uma perturbação sísmica se propaga através de meios porosos saturados de fluido na forma de uma onda de rotação (cisalhamento) e duas de dilatação (pressão). As duas ondas de pressão são chamadas de ondas rápidas e lentas. As ondas rápidas correspondem às partes sólidas e fluidas que se movem na fase, enquanto as ondas lentas correspondem às partes sólidas e fluidas que se movem fora da fase. Biot também mostra que as ondas lentas se propagam em velocidades mais baixas do que as ondas rápidas. A teoria de Biot indica que as ondas lentas se dissipam rapidamente com a distância da fonte. No entanto, essas ondas são geradas novamente quando as ondas rápidas cruzam as interfaces entre meios porosos saturados de fluido diferentes (Geertsma e Smit, 1961).

Nourbehecht (1963) falha em fazer uso da teoria de Biot quando estuda os efeitos

do acoplamento termodinâmico irreversível em meio poroso e investiga o acoplamento eletrocinético assumindo material sólido estacionário e permite apenas o fluxo de fluido. Novamente, nenhuma atenção é dada à conversão de energia eletrossísmica associada às ondas de cisalhamento. Seus resultados, no entanto, mostram que o ângulo de incidência das ondas de pressão que incidem sobre uma fronteira entre dois meios porosos saturados de fluido precisa ser diferente de zero para a geração de um sinal elétrico detectável na superfície.

Neev e Yeatts (1989) propõem equações que tentam modelar o acoplamento entre ondas mecânicas e campos elétricos. Como seu trabalho não é baseado no conjunto completo de equações de Maxwell, eles também concluem incorretamente que as ondas de cisalhamento não geram ondas eletromagnéticas.

O primeiro desenvolvimento teórico na teoria eletrossísmica que incorpora o conjunto completo da equação de Maxwell é atribuído a Pride (1994). O autor usa argumentos para derivar um conjunto de equações governantes macroscópicas que descrevem fenômenos eletrossísmicos. Essas equações consistem nas equações de Biot acopladas às equações de Maxwell por meio de duas equações de transporte que satisfazem o princípio de reciprocidade de fluxos acoplados de Onsager.

Haartsen (1995) e Pride e Haartsen (1996) usam as equações governantes dos fenômenos eletrossísmicos para estudar ondas planas em meios porosos homogêneos. Seus resultados mostram que, para ondas longitudinais planas, a corrente induzida por gradientes de pressão é balanceada por uma corrente de condução oposta e equivalente acionada pelo campo elétrico cossísmico. Portanto, não há corrente elétrica líquida dentro da onda sísmica.

Como resultado, não ocorre nenhuma radiação de onda eletromagnética. Da mesma forma, ondas de cisalhamento planas em meios homogêneos podem causar fluxo relativo de fluido-sólido devido ao deslocamento dos grãos sólidos, configurando assim um campo magnético cossísmico e um pequeno campo elétrico cossísmico induzido que viaja junto com a onda de cisalhamento. Como não há desequilíbrio de corrente dentro da onda de cisalhamento, nenhuma onda eletromagnética é gerada. Quando a onda sísmica é, no entanto, incidente em uma interface entre meios de diferentes propriedades eletrossísmicas, um desequilíbrio de corrente dinâmico é causado pela variação na densidade de corrente através da interface. Este desequilíbrio de corrente gera uma onda eletromagnética que se propaga independentemente da onda sísmica, dando origem à resposta da interface, conforme observado nos dados de campo de Ivanov (1939), Martner e Sparks (1959), Thompson e Gist (1993), Bu-

tlar et al. (1996), Mikhailov et al. (1997), Garambois e Dietrich (2001) e Haines et al. (2001).

Haartsen e Pride (1997) usam as equações que regem os fenômenos eletrossísmicos e o Método da Matriz Global para investigar ondas eletrossísmicas de fontes pontuais em camadas. Seus resultados indicam que a resposta da interface mostra semelhanças com o campo de ondas que seria obtido se a interface fosse substituída por um dipolo elétrico oscilante equivalente posicionado na interface diretamente abaixo da fonte sísmica. Esta observação confirma que a resposta da interface é devido à geração de ondas eletromagnéticas de propagação independente na fronteira entre meios porosos saturados com fluido diferentes. Haartsen et al. (1998) usam posteriormente a teoria de Biot para calcular a quantidade de fluxo relativo induzido pela solução da função de Green. Desta forma, eles estudam as correntes de fontes de ponto sísmico em meios poroelásticos homogêneos em função da salinidade, porosidade e permeabilidade.

Usando um método relacionado ao Método da Matriz Global Ranada Shaw et al. (2000) chegam a expressões para a reflexão eletrossísmica e coeficientes de transmissão pertencentes a uma interface entre dois meios porosos. Eles investigam a influência da porosidade / permeabilidade e contrastes de salinidade na magnitude da resposta da interface.

Garambois e Dietrich (2001) derivam funções de transferência eletrossísmica (e magnetossísmica) para os campos elétrico e magnético cossísmico. As funções de transferência eletrossísmica fornecem relações lineares entre as amplitudes do deslocamento do grão sólido associado às ondas de pressão rápidas e lentas e as amplitudes dos campos elétricos cossísmicos resultantes. Da mesma forma, a transferência magnetossísmica representa uma relação linear entre a amplitude do deslocamento do grão sólido devido à passagem de uma onda de cisalhamento e a amplitude do campo magnético induzido. A exatidão das funções de transferência é confirmada pela comparação com os dados de campo registrados.

Todas essas pesquisas sugerem que o acoplamento eletrocínético pode ser usado como ferramenta geofísica para caracterizar conteúdo de fluido e microestrutura.

3 *Metodologia*

Apresenta-se neste capítulo a metodologia científica a ser utilizada no desenvolvimento deste trabalho. Inclui-se informações sobre a motivação para o tema, classificação da pesquisa (área da pesquisa), instrumentos utilizados (materiais, equipamentos, softwares), dados, experimentos/ensaios/simulações e formas de análise e interpretação.

3.1 Motivação Para o Tema

- Envolvimento anterior com o tema:
 - Conhecimentos adquiridos nas disciplinas: Métodos Geofísicos de Exploração II - Sísmicos, Propriedades Físicas de Minerais e Rochas, Métodos da Física-Matemática, Perfilagem de Poços I e Interpretação Integrada Geologia-Geofísica.
- Usos futuros do conhecimento na área em estudo:
 - Elaboração de softwares aplicativos considerando os conceitos analisados;
 - Como tema base para a realização de mestrado/doutorado;
 - Estudo e aperfeiçoamento das variáveis envolvidas.
- Fonte de interesse atual pelo tema:
 - Discussões com o orientador dos processos físicos envolvidos, realização de exercícios preliminares sobre o assunto.
- Facilidades pessoais do aluno para a abordagem do tema:
 - Estudo dos conceitos matemáticos e físicos envolvidos no processo.
- Dificuldades atuais do aluno que podem ser minoradas a partir do trabalho:

- Dificuldades no trato da língua inglesa;
- Necessidade de ampliar conhecimentos em programação e utilização de simulação no computador;
- Ampliação do conhecimento de alguns conceitos envolvidos no processo.

3.2 Classificação da Pesquisa

Podemos classificar o tipo de pesquisa sob diferentes aspectos, a seguir, fazemos a classificação deste trabalho quanto ao fim, quando ao tipo de modelagem e quanto ao tipo de análise.

3.2.1 Quanto ao fim, área, sub-área e disciplinas relacionadas

- Quanto ao fim:
 - Aplicada.
- Área de estudo:
 - Geociências.
- Sub-área de estudo:
 - Geofísica.
- Subordinação do tema a áreas do conhecimento científico:
 - Matemática aplicada e computacional;
 - Engenharia de petróleo;
 - Geofísica de poço;
 - Mecânica do contínuo.
- Disciplinas relacionadas:
 - Métodos Geofísicos de Exploração II - Sísmicos;
 - Propriedades Físicas de Minerais e Rochas;
 - Métodos da Física-Matemática;
 - Perfuração de Poços I;
 - Interpretação Integrada Geologia-Geofísica.

3.2.2 Quanto ao tipo de modelagem

O presente trabalho é de caráter teórico, pois envolve o estudo de modelos físicos e matemáticos, e o desenvolvimento de equações diferenciais que dão resposta ao problema proposto. Embora possam ser utilizados modelos numérico-computacionais e o desenvolvimento de algoritmos e programas, a essência do problema científico é tratada através do modelo físico-matemático.

3.2.3 Quanto ao tipo de análise

Quanto ao tipo de análise pode-se classificar a pesquisa em analítica.

3.2.4 Limitação do trabalho

Apresenta-se nesta subseção as limitações deste trabalho.

3.2.4.1 Limitações espaciais:

- Todo o trabalho será desenvolvido no LENEP/CCT/UENF.

3.2.4.2 Limitações quanto ao setor da indústria

- O presente trabalho estabelece um estudo ligado a engenharia de petróleo e a setores de geofísica de poço e petrofísica.

3.2.4.3 Limitações quanto a fase do empreendimento atingida

- Neste trabalho se pretende realizar uma simulação computacional para um meio 1D estratificado e uma simulação para um meio 1D homogêneo, a fim de se obter a validação do desenvolvimento analítico realizado.

3.2.5 Pressupostos

- Para o presente estudo, a simulação computacional será realizada utilizando-se os dados disponíveis em (BLANC et al., 2013 e Al-Besharah, Salman e Akashah, 1987).

3.2.6 Hipóteses de trabalho

1. Meio elástico e condutivo em meios 1D;
2. Meio elástico e condutivo com camadas homogêneas e estratificadas;
3. Poros do meio poroso são interconectados e totalmente saturados com um fluido;
4. A amplitude das perturbações é pequena;
5. Altas frequências;
6. Os efeitos termo-mecânicos são negligenciáveis.

3.3 Simulação Computacional

Será feita uma simulação computacional com o intuito de se obter a validação do desenvolvimento analítico realizado, que calcula a solução do sistema de equações derivadas por S. Pride, consistindo nas equações de movimento acopladas de Biot e nas equações de Maxwell para um meio elástico e condutivo com camadas homogêneas e estratificadas com a presença de fonte do tipo pontual vertical.

Após apresentação dos resultados obtidos, será feita uma análise desses resultados, baseando-se na teoria da propagação de ondas elástica e condutiva em um meio poroso saturado para altas frequências.

3.3.1 Equipamento

- Sistema operacional: Windows 8.1 64 bits (6.3, compilação 9600); Fabricante do sistema: Standard; Modelo do sistema: AHV; Processador: Intel (R) Core (TM); 3-2310M CPU @ 2.10GHz (4 CPUs), ~2.1GHz; Memória: 4096 MB RAM; Versão do DirectX: DirectX 11.

3.3.2 Software

- MatLab. Versão (R2020a). 64-bit (win64).

Referências

CARCIONE, J. (2007) Wave Fields in Real Media: Wave Propagation in Anisotropic, Anelastic, Porous and Electromagnetics Media. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.

FRENKEL, J. (1944) On the theory of seismic and seismoelectric phenomena in a moist soil. J. Phys. (Soviet), 8, 230–241.

HAN, Q. and WANG, Z. (2001) Time-domain simulation of SH-wave-induced electromagnetic field in heterogeneous porous media: A fast finite element algorithm. Geophysics, 66 (2), 448–461.

HORNBOSTEL, S. and THOMPSON, A. H. (2007) Waveform design for electro-seismic exploration. Geophysics.

IVANOV, A. (1939) Effect of electrization of earth layers by elastic waves passing through them. Dokl. AN SSSR, 24(1), 42–45.

JOUNIAUX, L.; ZYSERMAN, F. Seismo-electrics, electro-seismics, and seismomagnetism for earth sciences. Solid Earth Discussions, v. 7, p. 2563–2662, 2015.

OLIVEIRA, I. B. de. Modelagem de propagação das ondas elásticas em meios porosos 1D: modelos de Biot vs. Biot-JKD. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2018.

PRIDE, S. (1994) Governing equations for the coupled electromagnetic and acoustics of porous media. Physical Review B, 50(21), 15678–15693.

PRIIMENKO, V.; VISHNEVSKII, M. Nonlinear mathematical problems of electromagnetoelastic interactions. Nonlinear Analysis Research Trends. New York: Nova Science Publishers, p. 99–155, 2008.

THOMAS, J. E. Fundamentos de engenharia de petroleo. Rio de Janeiro: Interciencia, 2004.

THOMPSON, A. and GUEST, G. (1993) Geophysical applications of electrokinetic conversion. *The Leading Edge*, 12(12), 1169–1173

THOMPSON, A. H. , HORNBOSTEL, S., et al. Field tests of electroseismic hydrocarbon detection. *Geophysics*, in press.

THOMPSON, A. H. (2005) Electromagnetic-to-seismic conversion: Successful developments suggest viable applications in exploration and production. 75th SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts, Houston.

THOMPSON, R. (1936) The seismic electric effect. *Geophysics*, 1(3), 327–335.

URSIN, B. (1983) Review of elastic and electromagnetic waves propagation in horizontally layered media. *Geophysics*, 48(8), 1063–1081.