

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

VICTOR ANTÔNIO PALUDETTO MAGRI

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO TÉRMICO PARA O  
ACOPLAMENTO POÇO-RESERVATÓRIO**

Florianópolis  
2012

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

VICTOR ANTÔNIO PALUDETTO MAGRI

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO TÉRMICO PARA O  
ACOPLAMENTO POÇO-RESERVATÓRIO**

Trabalho apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico

Orientador: Prof. Antônio Fábio de Carvalho Silva, Dr.

Florianópolis  
2012

VICTOR ANTÔNIO PALUDETTO MAGRI

## **DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO TÉRMICO PARA O ACOPLAMENTO POÇO-RESERVATÓRIO**

Este Trabalho de Curso foi julgado adequado para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico e aprovado em sua forma final pela Comissão examinadora e pelo Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

---

Prof. Lauro César Nicolazzi, Dr.  
Coordenador do Curso

---

Prof. Dylton do Vale Pereira Filho, M.Sc.  
Professor da Disciplina

### **Comissão Examinadora:**

---

Prof. Antônio Fábio de Carvalho Silva, Dr.  
Orientador

---

Prof. Clóvis Raimundo Maliska, Ph.D.  
Co-Orientador

---

Eng. Maurício Pereira Tada, M.Sc.  
Departamento de Engenharia Mecânica,  
UFSC

---

Eng. Arthur Besen Soprano  
Departamento de Engenharia Mecânica,  
UFSC

Florianópolis  
2012

Aos meus pais e blablabla

## **AGRADECIMENTOS**

A todos os integrantes do laboratório SINMEC.

“I thought of that while riding my bicycle - Albert Einstein”

## **RESUMO**

Este é o meu resumo, a ser desenvolvido posteriormente.

## **ABSTRACT**

This is my abstract, to be developed in the future.



## **LISTA DE FIGURAS**

## **LISTA DE TABELAS**

## LISTA DE SÍMBOLOS

$c$	compressibilidade	$[1/Pa]$ , p. 14
$r_w$	raio do poço	$[m]$ , p. 14
$u$	energia interna específica	$[J/Kg]$ , p. 14
$K$	permeabilidade absoluta	$[m^2]$ , p. 14
$Re$	número de Reynolds	$[-]$ , p. 14
$\alpha$	difusividade térmica	$[m^2/s]$ , p. 14
$\partial\Omega$	Fronteira do domínio $\Omega$	$[-]$ , p. 14
$\Omega$	Domínio	$[-]$ , p. 14

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

VER Volume elementar representativo,

p. 14

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>14</b>
1.1	Motivação . . . . .	14
1.2	Objetivos . . . . .	14
1.3	Organização do trabalho . . . . .	14
<b>2</b>	<b>Fundamentação Teórica</b>	<b>15</b>
2.1	Meios Porosos . . . . .	15
2.1.1	Conceitos Preliminares . . . . .	15
2.1.2	Dispersão . . . . .	16
2.1.3	Método da Média Volumétrica Local . . . . .	16
2.2	Modelos de Produtividade para Poços . . . . .	16
2.3	Temperature Logging e Reservoir Management . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Modelo do Reservatório</b>	<b>18</b>
3.1	Introdução . . . . .	18
3.2	Equações governantes . . . . .	19
3.2.1	Conservação da Massa . . . . .	20
3.2.2	Conservação da Quantidade de Movimento . . . . .	20
3.2.3	Conservação da Energia Mecânica . . . . .	21
3.2.4	Conservação da Energia Térmica . . . . .	21
<b>4</b>	<b>Modelo do Poço</b>	<b>22</b>
4.1	Introdução . . . . .	22
4.2	Equações governantes . . . . .	22

4.2.1	Conservação da Massa . . . . .	22
4.2.2	Conservação da Quantidade de Movimento . . . . .	22
4.2.3	Conservação da Energia total . . . . .	23
<b>5</b>	<b>Acoplamento Poço-Reservatório</b>	<b>24</b>
<b>6</b>	<b>Resultados</b>	<b>25</b>
<b>7</b>	<b>Conclusões</b>	<b>26</b>
<b>8</b>	<b>Recomendações</b>	<b>27</b>
	<b>Apêndice A -- Resultados de cálculo vetorial e tensorial</b>	<b>28</b>
	<b>Apêndice B -- Solução Analítica do Modelo do Reservatório</b>	<b>29</b>
	<b>Apêndice C -- Propriedades dos fluidos</b>	<b>30</b>
C.1	Fase Água . . . . .	30
C.2	Fase Óleo . . . . .	30
C.3	Fase Gás . . . . .	30
	<b>Referências</b>	<b>31</b>

# **1 INTRODUÇÃO**

teste com símbolos:

teste com sigla:

Esta é a introdução.

- Por que simular? (Introdução do manual e300)

## **1.1 MOTIVAÇÃO**

Falar sobre a motivação do trabalho

## **1.2 OBJETIVOS**

Falar sobre os objetivos do trabalho

## **1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

Como o trabalho está distribuído? Qual a ordem das seções? O que fala cada uma delas?

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Fundamentação teórica do trabalho

### 2.1 MEIOS POROSOS

Um meio poroso é uma matriz sólida que contém uma infinidade de espaços vazios, ou poros, os quais podem estar conectados continuamente, permitindo que um fluido armazenado nesses poros possa escoar entre eles. (FAGHRI, 2006)

-No petróleo....

-Considerar as escalas naturalmente presente em problemas de escoamento em meios porosos. Quando a ordem de grandeza dos poros é igual a ordem de grandeza do sistema, o meio poroso deve ser modelado diretamente com através da resolução das equações para escoamento livre e considerando a geometria da matriz porosa. No caso em que aquela ordem de grandeza é muito menor que a última, a simulação direta do escoamento no meio poroso não é praticável, assim, técnicas de média volumétrica são utilizadas para a modelagem do escoamento.

-Melhorar esse nome

-Revisar resultados importantes para meios porosos

#### 2.1.1 CONCEITOS PRELIMINARES

-Apresentar conceitos importantes quando se trata de meios porosos: Porosidade, Permeabilidade, Saturação (escoamento de mais de uma fase)

-Apresentar conceito do Volume Elementar Representativo

-Discussão boa sobre REV no capítulo 3 do Handbook of Porous Media



### **2.1.2 DISPERSÃO**

- Falar sobre dispersão em meios porosos, um resumo bem breve com os principais resultados e ilustrando bem o conceito, deixando ele bem claro... Capítulo 3 do Handbook de Porous Media

### **2.1.3 MÉTODO DA MÉDIA VOLUMÉTRICA LOCAL**

- Dúvidas a respeito dos teoremas para média de um divergente e de uma derivada temporal. Notar que as equações alteram de sinal de acordo com a fase em consideração (sólida ou líquida), isso ocorre pela convenção do sinal de  $ds$

-Mostrar a prova contida no handbook de Porous Media, página 46-47. Ela é mais simples que a do (KAVIANY, 1995)

-A prova do teorema da média volumétrica para o gradiente deve ser mostrada (aplicar o teorema da média volumétrica para o divergente em cada uma das componentes de um vetor, somá-las e obter o resultado desejado.

-Apresentar a ideia do método

-Deduzir suas equações relevantes

-Apresentar subseções com conceitos importantes? Como porosidade, permeabilidade...

-Técnicas de média volumétrica são utilizadas na resolução de problemas multifásicos em que não é necessário encontrar a posição das interfaces entre as diferentes fases do sistema e também as flutuações locais das propriedades em estudo.

## **2.2 MODELOS DE PRODUTIVIDADE PARA POÇOS**

- Poços horizontais - Poços verticais - Semi-analítico.... - Modelos de produtividade para poços

## **2.3 TEMPERATURE LOGGING E RESERVOIR MANAGEMENT**

-A importância de se ter o perfil de temperatura no poços - Uso de DTS - Sensores de temperatura distribuídos - Review de temperature logging. Porque isso é importante? Citar Reservoir Management, usar o artigo que temos - Diferença entre perfis de temperatura em poços verticais (sofre o efeito do gradiente geotérmico) e poços horizontais (termos de dissipação viscosa e expansão térmica são importantes)

### 3 MODELO DO RESERVATÓRIO

Apresenta-se a dedução do modelo matemático do reservatório

- O reservatório é um meio poroso, falar sobre meios porosos
- Incluir, talvez, uma seção que fala sobre meios porosos

#### 3.1 INTRODUÇÃO

Na maioria dos modelos térmicos de poço, assume-se que a temperatura do fluido proveniente do reservatório é dada segundo o gradiente geotérmico. Alguns autores adicionaram o efeito de compressão/expansão térmica numa região suficientemente próxima do poço (BUSCAR REFERENCIAS).

Em poços verticais, tal fenômeno é praticamente insignificante se comparado à variação de temperatura devido ao gradiente geotérmico. Por sua vez, quando se lida com poços horizontais ou de inclinação desprezível, a temperatura do fluido que entra no poço não apresenta influência do gradiente geotérmico, logo, torna-se necessária a consideração de efeitos antes desprezíveis na modelagem de poços verticais. (??)

- Apresentar a necessidade de um modelo para reservatório

- Comparar o modelo que será desenvolvido com os já existentes e em uso em softwares comerciais

- Discutir sobre quais fenômenos físicos estamos querendo modelar no reservatório e portanto, quais deles devem ser modelados pelas equações que serão desenvolvidas

- Ideia para a dedução das equações: apresentar as relações fundamentais do método da média volumétrica e utilizá-las sem mencionar integrais no volume, o máximo possível, para deixar clara a dedução das equações feitas aqui.

- Falar em algum lugar no desenvolvimento das equações que elas são válidas para o caso laminar e de fluido newtoniano. A expressão para o tensão tensão em escoamentos turbulentos poderia ser utilizado se a média no tempo fosse empregada. (Transport Phenomena)

TESTE COM GIT - VITORIA

## 3.2 EQUAÇÕES GOVERNANTES

Apresenta-se aqui o modelo numérico empregado na representação do reservatório.

Um sistema multifásico é diferenciado de um sistema monofásico pela presença de uma ou mais interfaces separando as fases. Ele pode ser considerado como um campo que é dividido em regiões monofásicas separadas por estas interfaces ou pode ser considerado como fronteiras móveis entre essas fases. (FAGHRI, 2006)

A resolução rigorosa de um escoamento multifásico envolve a aplicação das equações de conservação em cada fase e também nas fronteiras que existem entre elas, assim, torna-se necessário a localização dessas fronteiras. No entanto, quanto maior o número e a complexidade das fases de um sistema, o rastreamento das fronteiras torna-se inviável. Essa observação é válida para meios porosos, visto a complexidade geométrica da matriz rochosa, que representa a fase sólida no escoamento multifásico (Para meios porosos funciona assim.... Tirar a generalização da afirmação apesar de a fonte ser genérica). Para fins de engenharia de reservatórios, tem-se que não é necessário obter a solução do escoamento em meios porosos com esse nível de detalhamento, mas sim, concentra-se naquela proveniente de um nível macroscópico de análise.

Modelos do tipo multi-fluido ou homogêneo podem ser utilizados nessa aproximação macroscópica, eles são baseados nas equações de conservação obtidas segundo a hipótese do contínuo e em técnicas de médias no espaço e tempo, as quais são as responsáveis por alterar a ordem de grandeza da escala em análise. Quando realiza-se a média espacial, tem-se o modelo multi-fluido, por outro lado, quando realiza-se a média ao longo de todas as fases presentes num volume de controle, tem-se o modelo homogêneo.

A modelagem direta do escoamento através de meios porosos é inviável pois estes constituem sistemas multifásicos cujas interfaces são de difícil representação. Logo, utiliza-se a técnica da média volumétrica em conjunto com as equações para escoamento livre a fim de se obter o modelo numérico do reservatório.

Utiliza-se a técnica euleriana para a descrição do escoamento. Segundo ela, as propriedades do fluido são quantificadas ao longo do domínio de escoamento e do tempo.

As equações governantes são escritas para um volume de controle arbitrário contido no domínio do escoamento, elas expressam a relação entre a mudança das propriedades do escoamento no interior do volume de controle e através dele.

### 3.2.1 CONSERVAÇÃO DA MASSA

-Apresentar a dedução da equação da conservação da massa.

### 3.2.2 CONSERVAÇÃO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO

Deduzir a equação da quantidade de movimento

-Apresentar primeiramente a equação para o caso de escoamento livre, depois pular para meio poroso usando a técnica da média volumétrica

-Falar da equação de Darcy

-Falar do modelo semi-eurístico, porque esse nome? O que significa cada termo? Quando pode ser desprezado?

-Segundo Kaviany, uma tentativa contínua de se ter uma equação que descreve tanto o movimento em meios porosos quanto em escoamentos livres pode ser observada. Os resultados obtidos até então nessa linha são de certo modo empíricos, apesar de muitos apresentarem rigorismo matemático elevado, é sempre necessário alguma condição para o fechamento do problema que é meio “xunxada”.

- Deduzir a equação para escoamento livre?

Henry Darcy, em 1856, desenvolveu um modelo empírico para o cálculo da resistência ao escoamento monofásico unidimensional em regime permanente provocada por um meio poroso uniforme, rígido, não-consolidado (Deixar claro o que é não-consolidado). Esse modelo se tornou conhecido como a lei de Darcy, apresentada na equação (3.1) (FAGHRI, 2006)

$$u = \frac{k}{\mu} \frac{dP}{dx} \quad (3.1)$$

Recentemente, (WHITAKER, 1986) apresentou uma derivação teórica dessa lei assumindo escoamento de Stokes ao longo de um meio poroso rígido e empregando o método da média volumétrica. A expressão obtida é, por sinal, mais genérica que a lei de Darcy, no sentido que é válida para meios anisotrópicos, conforme mostrada na equação (3.2)

$$\langle \mathbf{v}_\beta \rangle = -\frac{\mathbf{K}}{\mu_\beta} \cdot \left[ \nabla \langle P_\beta \rangle^\beta - \rho_\beta \mathbf{g} \right] \quad (3.2)$$

De acordo com a hipótese de Stokes, o termo inercial da equação de conservação da

quantidade de movimento, dado pela soma entre dos termos de transporte advectivo e de acumulação de quantidade de movimento, é desconsiderado obtenção da lei de Darcy. No entanto, tal termo pode ser importante (EM QUAL SITUAÇÃO? QUAL FÍSICA ELE MODELA) e para tanto, a seguinte extensão da lei de Darcy é proposta por (POR QUEM, ORIGINALMENTE?)

ESTE É UM TESTE PARA O GIT

ESTE É UM TESTE PARA O GIT

### 3.2.3 CONSERVAÇÃO DA ENERGIA MECÂNICA

Deduzir a equação da conservação da energia mecânica, explicar fisicamente cada termo

-Falar sobre dispersão da quantidade de movimento ? Há algo no Handbook of Porous Media

-Capítulo 3 do Handbook of Porous Media mostra a dedução da equação da conservação da quantidade de movimento para meio poroso

-Consultar o paper já na base de dados: The limitations of the brinkman-Forchheimer extended Darcy equation (Ref 100 do cap 3 do handbook of porous media).

### 3.2.4 CONSERVAÇÃO DA ENERGIA TÉRMICA

Deduzir a equação da energia térmica, explicar fisicamente cada termo

- Falar sobre dispersão da energia térmica

- Quando se pode assumir equilíbrio térmico entre rocha e fluido?

- O que muda na equação se não assumíssemos o equilíbrio térmico?

## **4 MODELO DO POÇO**

Aqui apresentam-se as equações do poço.

Estudar Fluid Flow and Heat Transfer in Wellbores

### **4.1 INTRODUÇÃO**

- Apresentar a necessidade de um modelo para o poço
- Comparar o modelo que será desenvolvido com os já existentes e em uso em softwares comerciais
- Discutir sobre quais fenômenos físicos estamos querendo modelar no poço e portanto, quais deles devem ser modelados pelas equações que serão desenvolvidas

### **4.2 EQUAÇÕES GOVERNANTES**

Aqui apresentam-se as equações governantes do poço...

#### **4.2.1 CONSERVAÇÃO DA MASSA**

- Deduzir a equação da conservação da massa
- Usar elementos cilíndricos e contemplar entrada de massa proveniente do reservatório pelas laterais do volume

#### **4.2.2 CONSERVAÇÃO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO**

- Deduzir a equação da conservação da quantidade de movimento

### 4.2.3 CONSERVAÇÃO DA ENERGIA TOTAL

- Esta abrange tanto a parcela térmica quanto a mecânica da conservação de energia
- Deduzir a equação, explicar o significado de cada um dos termo
- Se possível, apresentar números adimensionais importantes que relacionam os termos distintos da equação
- Yoshioka despreza os termos de energia cinética e dissipação viscosa no poço. Será que isso é válido para escoamentos de gás a altas velocidades? Encontrar um número adimensional para responder essa questão.



## **5 ACOPLAMENTO POÇO-RESERVATÓRIO**

-Falar sobre as variáveis envolvidas no acoplamento poço-reservatório nas equações do movimento e da energia. -Esse capítulo não deve ser muito grande....

## **6 RESULTADOS**

-Apresentar os resultados do modelo desenvolvido -Estudo de casos.....

## 7 CONCLUSÕES

Aqui listam-se as conclusões e recomendações

-A partir dos resultados apresentados, juntar o que se pode inferir deles e listar nesse capítulo de conclusões

-O objetivo inicial do trabalho foi alcançado? Questões foram respondidas? DTS pode ser empregado?

-Simulações de temperatura ao longo do poço são válidas com esse modelo? Um caso real para comparação na seção de resultados ia bem.. Se nao me engano Yoshioka tem um desses, talvez em algum dos seus papers.

## **8 RECOMENDAÇÕES**

- Próximos passos
- Sugestões para próximos trabalhos

## **APÊNDICE A -- RESULTADOS DE CÁLCULO VETORIAL E TENSORIAL**

-Listar no apêndice alguns conhecimentos necessários para o entendimento do trabalho como resultados de cálculo, cálculo tensorial, álgebra, teorema do transporte de Reynolds.....

## **APÊNDICE B -- SOLUÇÃO ANALÍTICA DO MODELO DO RESERVATÓRIO**

-Apresentar os passos para a dedução da solução analítica do modelo do reservatório simplificado

## **APÊNDICE C -- PROPRIEDADES DOS FLUIDOS**

-Listar relações utilizadas no cálculo das propriedades dos fluidos

### **C.1 FASE ÁGUA**

### **C.2 FASE ÓLEO**

### **C.3 FASE GÁS**

## REFERÊNCIAS

FAGHRI, Y. Z. A. *Transport Phenomena in Multiphase Systems*.  
<https://www.thermalfluidscentral.org/e-books/book-intro.php?b=42>: Elsevier, 2006.  
Disponível em: <<https://www.thermalfluidscentral.org/e-books/book-intro.php?b=42>>.

KAVIANY, M. *Principles of Heat Transfer in Porous Media*. Springer-Verlag, 1995. (Mechanical Engineering Series). ISBN 9780387945507. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=pX61QAOKKqsC>>.

WHITAKER, S. Flow in porous media i: A theoretical derivation of darcy's law. Kluwer Academic Publishers, v. 1, n. 1, p. 3–25–, 1986. ISSN 0169-3913. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/BF01036523>>.