



**Niurka Patricia Rodriguez Yaquetto**

**Avaliação de Esquemas de Acoplamento  
na Simulação de Reservatórios de Petróleo**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do título de Mestre pelo programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Sergio A. Barreto da Fontoura  
Co-orientador: Prof. Nelson Inoue

Rio de Janeiro  
Junho de 2011



**Niurka Patricia Rodriguez Yaquetto**

**Avaliação de Esquemas de Acoplamento  
na Simulação de Reservatórios de Petróleo**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do título de Mestre pelo programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

**Prof. Sergio Augusto Barreto da Fontoura**

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC - Rio

**Prof. Deane Roelh**

DEC/PUC-Rio

**Prof. Elton J. B. Ribeiro**

Petrobras

**Prof. Nelson Inoue**

Co- Orientador

GETP/PUC-Rio

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial

Centro Técnico Científico – PUC - Rio

Rio de Janeiro, 17 de junho de 2011.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial deste trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Niurka Patricia Rodriguez Yaquetto**

Graduou-se em Engenharia Civil, na Universidade San Antonio Abad del Cusco (Cusco, Perú-2009). Trabalhou no campo de pavimentos até 2008. No ano 2009 ingressou ao curso de Mestrado em Engenharia Civil na Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro, na área de Geotécnica desenvolvendo sua dissertação de mestrado na linha de pesquisa da Geomecânica do Petróleo.

### **Ficha catalográfica**

Rodriguez Yaquetto, Niurka Patricia

Avaliação de esquemas de acoplamento na simulação de reservatórios de pretróleo / Niurka Patricia Rodriguez Yaquetto ; orientador: Sergio A. Barreto da Fontoura ; co-orientador: Nelson Inoue. – 2011.

141 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2011.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Analise acoplado. 3. Acoplamento interativo. 4. Acoplamento total. 5. Geomecânica. 6. Simulador de reservatório. I. Fontoura, Sergio A. Barreto da. II. Inoue, Nelson. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

## Agradecimentos

Agradeço ao Prof. Sérgio A. B. da Fontoura pela oportunidade de desenvolvimento deste trabalho, por sua orientação e confiança.

Agradeço ao meu co-orientador Nelson Inoue pelos conhecimentos transmitidos e pela ajuda e dedicação que possibilitaram a realização desta pesquisa.

Agradeço ao GTEP pela estrutura oferecida, tanto pessoal quanto de equipamentos, cujo apoio foi essencial.

Ao órgão CAPES pelo apoio financeiro e à PUC-Rio que me deu a oportunidade de fazer o mestrado.

Agradeço aos meus pais, Edwin e Regia, aos meus irmãos, Edwin e Pamela por todo o amor e confiança. Um agradecimento especial à Pamela pelo apoio incondicional.

Aos meus amigos pela força e amizade.

## Resumo

Rodriguez, Niurka Patricia Yaquetto; Fontoura, Sérgio Augusto Barreto da. (Orientador). **Avaliação de esquemas de acoplamento na simulação de Reservatórios de Petróleo.** Rio de Janeiro, 2011, 141p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Os estudos entre a interação do fluxo de fluido e a deformação do meio poroso têm sido realizados com o objetivo de explicar alguns fenômenos que ocorrem ao longo da produção/injeção de fluidos, e assim obter uma simulação de reservatórios cada vez mais precisa. A solução ideal para o problema é implementar um esquema, onde as leis que governam o fluxo e análise de tensões sejam obedecidas simultaneamente em cada intervalo de tempo. Este trabalho apresenta os resultados de um código (programado em C++) que permite acoplar um simulador de fluxo convencional (ECLIPSE) e um programa que permite analisar tensões e deslocamentos (Abaqus /CAE). O objetivo deste trabalho é validar varias soluções para resolver um problema usando os diferentes tipos de acoplamento, que juntamente com uma filosofia empregada nas principais formulações permite dar respostas similares aquelas do acoplamento total. São apresentadas as formas de acoplamento e a formulação empregada em cada um dos esquemas usados. Os resultados obtidos pelos esquemas são comparados em termos de fluxo e tensões e deslocamentos a partir de modelos tridimensionais.

## Palavras- Chave

Análise acoplado; acoplamento iterativo; acoplamento total; geomecânicas; simulador de reservatório.

## Abstract

Rodriguez, Niurka Patricia Yaquetto; Inoue Nelson (co-Advisor); Fontoura, Sérgio Augusto Barreto da. (Advisor). **Evaluation of Coupling Schemes in the Simulation of Petroleum Reservoirs.** Rio de Janeiro, 2011, 141p. Msc. Dissertation— – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Studies between the interaction of fluid flow and deformation of porous media have been carried out with the aim of explaining some phenomena that occur along the production/injection of fluids, thereby obtaining a more accurate reservoir simulation. The ideal solution for this problem is to implement a scheme where laws governing the flow and stress analysis are met simultaneously at each time interval. This dissertation presents the results of a computer code (programmed in C++) that allows the coupling of a conventional reservoir simulator (ECLIPSE) and a stress-displacement finite element based program (Abaqus /CAE). This work presents the use of various coupling schemes for the solution of a synthetic case, in particular the use of a methodology that generates results very close to the ones predicted from the use of fully coupled methods. The results obtained by the different coupling schemes are compared in terms of fluid pressure, stress and displacement responses for synthetic three-dimensional models.

## Keywords

Coupled analysis; explicit coupling; full coupling; geomechanics; reservoir simulator

## SUMARIO

<b>1. Introdução</b>	<b>18</b>
1.1. Contexto	18
1.2. Descrição do Trabalho	19
1.3. Objetivos da Dissertação	22
1.4. Estrutura da Dissertação	22
 <b>2. Estudo dos Acoplamentos</b>	 <b>24</b>
2.1. Tipos de Acoplamento	24
2.1.1. Acoplamento Total	25
2.1.1.1. Vantagens do Acoplamento Total	25
2.1.1.2. Desvantagens Acoplamento Total	26
2.1.2. Acoplamento Explícito ( <i>one way coupling</i> )	26
2.1.2.1. Vantagens do Acoplamento Explícito	27
2.1.2.2. Desvantagens do Acoplamento Explícito	28
2.1.3. Acoplamento Parcial Iterativo	28
2.1.3.1. Vantagens do Acoplamento Iterativo	30
2.1.3.2. Desvantagens do Acoplamento Iterativo	30
2.1.4. Pseudo-Acoplamento	30
2.1.4.1. Vantagens do Pseudoacoplamento.	31
2.1.4.2. Desvantagens do Pseudo acoplamento.	32
2.2. Viabilidade nos Tipos de Acoplamento	32
2.3. Artigos que discutem o tema de acoplamento	34
2.3.1. Gutierrez & Lewis (1998)	34
2.3.2. Settari & Mourits (1994,1999)	34
2.3.3. Dean, <i>et al.</i> , (2003)	35
2.3.4. Tran, <i>et al.</i> , (2005 a)	35
2.3.5. Tran, <i>et al.</i> , (2005 b)	36
2.3.6. Samier & Gennaro (2007)	37
2.3.7. Inoue & Fontoura (2008,2009)	37
 <b>3. Desenvolvimento do Acoplamento</b>	 <b>39</b>
3.1. Estudo dos Simuladores	39
3.1.1. Softwares envolvidos no Acoplamento	40

3.1.2. Modelagem do Reservatório	41
3.1.2.1. Geometria do Modelo	41
3.1.2.2. Número de Células	43
3.1.2.3. Cálculo das variáveis	43
3.1.3. Estudo Software com módulo Geomecânico	45
3.1.3.1. Modelo Geomecânico:	45
3.1.3.2. Descrição do Acoplamento Iterativo no STARS	45
3.2. Formulação dos Esquemas de Acoplamento	48
3.2.1. Equações Governantes	48
3.2.2. Simulação convencional de fluxo	48
3.2.2.1. Equação de Continuidade	49
3.2.2.2. Equação de fluxo	50
3.2.2.3. Equação de estado	51
3.2.3. Acoplamento Total	52
3.2.3.1. Equações de equilíbrio	52
3.2.3.2. Compatibilidade deformação-deslocamento	53
3.2.3.3. Teoria da Elasticidade	53
3.2.4. Acoplamento Parcial	57
3.3. Filosofia empregada na tese	58
3.4. Esquemas de Acoplamento Utilizados	59
3.5. Fluxograma dos programas implementados	60
3.5.1. Acoplamento Parcial Iterativo	60
3.5.2. Acoplamento parcial em duas vias com duas iterações	61
3.5.3. Acoplamento parcial em uma via	62
<b>4. Resultados</b>	<b>64</b>
4.1. Introdução	64
4.2. Validação dos esquemas	64
4.3. Resultados de Validação	69
4.3.1. Variação da Pressão Média	69
4.3.2. Variação da Compactação	71
4.3.3. Variação da Subsistência	73
4.3.4. Variação da Pressão de Poros	74
4.4. Resultados de Viabilidade	77
4.5. Resultados com variação de Critério de Tolerância	80
4.5.1. Variação da Pressão Média	80
4.5.2. Variação da Compactação	81



4.5.3. Variação da Subsidência	82
4.5.4. Variação da Pressão de Poros	83
4.6. Resultados de Viabilidade	85
4.7. Análise de Tensões e deslocamentos	86
4.7.1. Variação dos Deslocamentos	87
4.7.2. Variação das Tensões Efetivas	97
<b>5. Resultados de uma nova discretização do modelo</b>	<b>125</b>
5.1.1. Variação da Pressão Média	125
5.1.2. Variação da Compactação e da Subsidência	126
5.1.3. Variação da Pressão de Poros	129
5.1.4. Resultados de viabilidade	131
<b>6. Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>135</b>
6.1. Conclusões	135
6.2. Trabalhos Futuros	136

## Lista de Figuras

Figura 1 - Modelo de um reservatório no início e final da produção (Capasso & Mantica, 2006).....	21
Figura 2 - Esquema de interação entre geomecânica e fluxo num reservatório deformável (Gutierrez & Lewis, 1998). ....	21
Figura 3 - Esquema de acoplamento implícito modificado (Pereira, 2007).....	25
Figura 4 - Esquema de acoplamento explícito modificado (Palma, 2008). ....	27
Figura 5 - Esquema acoplamento iterativo modificado (Tran, <i>et al.</i> , 2005).....	29
Figura 6 - Esquema de pseudo-acoplamento modificado (Pereira, 2007). ....	31
Figura 7 - Balanço dos aspectos do acoplamento (Tran, <i>et al.</i> , 2009).....	33
Figura 8 - Construção de uma malha de elementos finitos: remoção de irregularidades (Capasso & Mantica, 2006). ....	42
Figura 9 - Localização onde as variáveis primárias são calculadas (Capasso & Mantica, 2006).....	44
Figura 10 - Condições de contorno (Computer Modelling Group STARS, 2009). ....	48
Figura 11 - Fluxo de fluido através de um volume de controle (Inoue & Fontoura, 2008). ....	49
Figura 12 - Equações governantes (Inoue & Fontoura, 2008).....	58
Figura 13- Compatibilização das equações de difusão (Inoue & Fontoura, 2008). ....	59
Figura 14 – Fluxograma esquema iterativo (Inoue & Fontoura, 2008).....	61
Figura 15- Fluxograma duas vias com duas iterações (Inoue & Fontoura, 2008). ....	62
Figura 16 – Fluxograma esquema de uma via (Inoue & Fontoura, 2008).....	63
Figura 17 – Perspectiva do modelo (ft). ....	66
Figura 18 - Representação plana do Reservatório.....	67
Figura 19 – Vista 3D do modelo.....	68
Figura 20 - Resultados de Pressão Média x Tempo.....	70
Figura 21 - Resultados comparativos de Pressão Média (Inoue & Fontoura, 2008). ....	71

Figura 22 - Resultados de Compactação x Tempo. ....	72
Figura 23 - Resultados de Subsidência x Tempo. ....	73
Figura 24 - Resultados de Pressão no eixo X Tempo (A). ....	74
Figura 25 - Resultados de Pressão no eixo X (B). ....	76
Figura 26 - Número de iterações Tol = 0,01 <i>psi</i> . ....	78
Figura 27 - Tempos de simulação Tol = 0,01 <i>psi</i> . ....	79
Figura 28 - Resultados de Pressão média Tol= 1 <i>psi</i> . ....	81
Figura 29 - Resultados de Compactação Tol= 1 <i>psi</i> . ....	82
Figura 30 - Resultados de Subsidência Tol= 1 <i>psi</i> . ....	83
Figura 31 - Pressão de poros Tol= 1 <i>psi</i> . ....	84
Figura 32 - Número de iterações Tol = 1 <i>psi</i> . ....	85
Figura 33 - Tempos de simulação Tol = 1 <i>psi</i> . ....	86
Figura 34 - Eixos horizontais $h_1$ e $h_2$ . ....	87
Figura 35 - Variação do deslocamento $U_x$ no topo do <i>overburden</i> pelo método de acoplamento total. ....	88
Figura 36 - Variação do deslocamento $U_x$ no topo do <i>overburden</i> pelo acoplamento iterativo. ....	89
Figura 37 - Comparativo dos métodos na variação do deslocamento $U_x$ no topo do <i>overburden</i> . ....	90
Figura 38 - Variação do deslocamento $U_z$ no topo do <i>overburden</i> pelo acoplamento total. ....	91
Figura 39 - Variação do deslocamento $U_z$ no topo do <i>overburden</i> pelo acoplamento iterativo. ....	91
Figura 40 - Comparativo da Variação do deslocamento $U_z$ no topo do <i>overburden</i> . ....	92
Figura 41 - Variação do deslocamento $U_z$ no topo do reservatório pelo acoplamento total. ....	93
Figura 42 - Variação do deslocamento $U_z$ no topo do reservatório pelo acoplamento iterativo. ....	94
Figura 43 - Comparativo da variação do deslocamento $U_z$ no topo do reservatório. ....	94
Figura 44 - Variação do deslocamento $U_z$ no topo do reservatório pelo acoplamento total. ....	95
Figura 45 - Variação do deslocamento $U_z$ no topo do reservatório pelo acoplamento iterativo. ....	96

Figura 46 – Comparativo da variação do deslocamento $U_z$ no topo do reservatório.....	97
Figura 47 – Eixos estudados para variação das tensões efetivas. ....	98
Figura 48 - Variação da tensão efetiva $\sigma'_{xx}$ ao longo do eixo $v_1$ pelo acoplamento total.....	99
Figura 49 - Variação da tensão efetiva $\sigma'_{xx}$ ao longo do eixo $v_1$ pelo acoplamento iterativo.....	99
Figura 50 – Comparativo da variação da tensão efetiva $\sigma'_{xx}$ ao longo do eixo $v_1$ .....	100
Figura 51 - Variação da tensão efetiva $\sigma'_{zz}$ ao longo do eixo $v_1$ pelo acoplamento total.....	102
Figura 52 - Variação da tensão efetiva $\sigma'_{zz}$ ao longo do eixo $v_1$ pelo acoplamento iterativo.....	102
Figura 53 - Comparativo da Variação da tensão efetiva $\sigma'_{zz}$ ao longo do eixo $v_1$ .....	103
Figura 54 - Variação da tensão efetiva $\sigma'_{xx}$ ao longo do eixo $h_1$ pelo acoplamento total.....	104
Figura 55 - Variação da tensão efetiva $\sigma'_{xx}$ ao longo do eixo $h_1$ pelo acoplamento iterativo.....	105
Figura 56 - Comparativo da variação da tensão efetiva $\sigma'_{xx}$ ao longo do eixo $h_1$ .....	106
Figura 57 – Variação da tensão efetiva $\sigma'_{zz}$ ao longo do eixo $h_1$ pelo acoplamento total.....	108
Figura 58 - Variação da tensão efetiva $\sigma'_{zz}$ ao longo do eixo $h_1$ pelo acoplamento iterativo.....	108
Figura 59 - Comparativo da variação da tensão efetiva $\sigma'_{zz}$ ao longo do eixo $h_1$ .....	109
Figura 60 - Variação da tensão efetiva $\sigma'_{xx}$ ao longo do eixo $h_2$ pelo acoplamento total.....	111
Figura 61 - Variação da tensão efetiva $\sigma'_{xx}$ ao longo do eixo $h_2$ pelo acoplamento iterativo.....	111

Figura 62 – Comparativo da variação de tensão efetiva $\sigma'_{xx}$ ao longo do eixo $h_2$ .	112
Figura 63 - Variação da tensão efetiva $\sigma'_{zz}$ ao longo do eixo $h_2$ pelo acoplamento total.	114
Figura 64 - Variação da tensão efetiva $\sigma'_{zz}$ ao longo do eixo $h_2$ pelo acoplamento iterativo.	114
Figura 65 Comparativo da variação da tensão efetiva $\sigma'_{zz}$ ao longo do eixo $h_2$ .	115
Figura 66 - Variação da tensão efetiva $\sigma'_{xx}$ ao longo do eixo $h_3$ pelo acoplamento total.	117
Figura 67 - Variação da tensão efetiva $\sigma'_{xx}$ ao longo do eixo $h_3$ pelo acoplamento iterativo.	117
Figura 68– Comparativo da variação da tensão efetiva $\sigma'_{xx}$ ao longo do eixo $h_3$ .	118
Figura 69 - Variação da tensão efetiva $\sigma'_{zz}$ ao longo do eixo $h_3$ pelo acoplamento total.	119
Figura 70 - Variação da tensão efetiva $\sigma'_{zz}$ ao longo do eixo $h_3$ pelo acoplamento iterativo.	120
Figura 71- Comparativo da variação da tensão efetiva $\sigma'_{zz}$ ao longo do eixo $h_3$ .	120
Figura 72 - Nova discretização do Modelo em Perspectiva.	124
Figura 73 - Resultados de Pressão Média Tol= 0,01 psi.	125
Figura 74 - Resultados de Pressão no eixo X Tol=1 psi.	126
Figura 75 - Resultados de Compactação Tol=0,01 psi.	127
Figura 76 - Resultados de Compactação Tol= 1psi.	127
Figura 77 - Resultados de Subsidência Tol=0,01 psi.	128
Figura 78 - Resultados de Subsidência x Tempo Tol=1 psi.	129
Figura 79 - Resultados de Pressão no eixo X Tol=1 psi.	130
Figura 80 - Resultados de Pressão no eixo X x Tempo Tol=1 psi.	131
Figura 81 – Número de iterações Tol = 0,01 psi.	131
Figura 82 - Número de iterações Tol = 1 psi.	132
Figura 83 - Tempos de simulação Tol =0,01 psi.	133

Figura 84 – Tempos de simulação Tol = 1 psi.....	133
--	-----

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Propriedades da rocha e do fluido.....	66
Tabela 2 - Valores de Convergência empregados. ....	69
Tabela 3 - Variações das pressões ao longo do eixo X (A). ....	75
Tabela 4 - Variações das pressões ao longo do eixo X (B). ....	77
Tabela 5 - Valores de Convergência empregados. ....	80
Tabela 6 - Variações das pressões ao longo do eixo X Tol=1 <i>psi</i> . ....	84
Tabela 7 - Valores de Convergência empregados. ....	87
Tabela 8 - Variações $\sigma'_{xx}$ no eixo vertical. ....	101
Tabela 9 - Variações $\sigma'_{zz}$ no eixo vertical.....	103
Tabela 10 - Variações das tensões $\sigma'_{xx}$ para $h_1$ .....	106
Tabela 11 - Variações das tensões $\sigma'_{zz}$ para $h_1$ .....	109
Tabela 12 - Variações da tensão $\sigma'_{xx}$ para $h_2$ .....	112
Tabela 13 - Variações das tensões $\sigma'_{zz}$ para $h_2$ .....	115
Tabela 14 - Variação da tensão $\sigma'_{xx}$ para $h_3$ . ....	118
Tabela 15 - Variação da tensão $\sigma'_{zz}$ para $h_3$ .....	121

## Lista de símbolos e abreviaturas

$n$  = intervalo de tempo

$T$  = temperatura

$S$  = saturação

$P$  = pressão

$\sigma$  = tensão

$u$  = deslocamento

$\phi'$  = porosidade efetiva

$\varepsilon$  = deformações

$q$  = vazão através do volume de controle

$u$  = velocidade aparente do fluido

$\rho$  = massa específica

$\phi$  = porosidade.

$multpv(m)$  = multiplicador de volume poroso

$s$  = trajetória do fluxo;

$v_s$  = *velocidade aparente do fluido* na direção do fluxo

$k_s$  = permeabilidade do meio poroso na direção do fluxo

$\gamma$  = peso específico do fluido

$\mu$  = viscosidade do fluido

$\Phi$  = potencial de fluxo

$\phi^0$  = porosidade na pressão de referência  $p^0$

$V_p^0$  = volume poroso na pressão de referência  $p^0$

$c_p$  = compressibilidade dos poros

$c_f$  = compressibilidade do fluido

$c_t$  = compressibilidade total

$\nabla^2$  = operador diferencial de Laplace

$E$  = Módulo de Elasticidade longitudinal ou de Young.

$G$  = Módulo de elasticidade transversal;

$\nu$  = coeficiente de Poisson da parte sólida.

$H$  = constante física poro elástica Biot



$\varepsilon_v$  = deformação volumétrica

$m$  = metros

$ft$  = pé

$psi$  = libra força por polegada quadrada

$bpd$  = barris por dia

$md$  = milidarcy

$lbm$  = libra massa

$^{\circ}F$  = Fahrenheit

$Pa$  = Pascal

$MPa$  = Megapascal

$\%$  = porcentagem

$Tol$  = tolerância