

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Paul Richard Ramírez Perdomo

**Estudo integrado de Sísmica 4D, Geomecânica e
Simulação de Reservatórios Aplicado a Processos de
Recuperação Térmica SAGD**

Tese de Doutorado

Tese de Doutorado apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Sérgio Arturo Barreto. da Fontoura
Co-Orientador: Cláudio Rabe

Rio de Janeiro, 26 de junho de 2009



**Estudo integrado de Sísmica 4D, Geomecânica e
Simulação de Reservatórios Aplicado a Processos de
Recuperação Térmica SAGD**

Tese de Doutorado apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Sérgio Arturo Barreto da Fontoura

Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Osvaldo Vidal Trevisan

Departamento de Engenharia de Petróleo - UNICAMP

Dr. Adalberto José Rosa

PETROBRAS

Prof. Celso Romanel

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Marcos Sebastião de Paula Gomes

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 26 de junho de 2009

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

Paul Richard Ramírez Perdomo

Graduou-se em Engenharia de Petróleos na USCO – Universidad Surcolombiana – Colômbia em 1997. Trabalhou com a HALLIBURTON (1998) como Engenheiro de Completação e na PRIDE como Engenheiro de Segurança Operacional (2001). Mestre em Engenharia de Petróleos pela UNICAMP em 2003

Ramírez Perdomo, Paul Richard

Estudo integrado de sísmica 4D, geomecânica e simulação de reservatórios aplicados a processos de recuperação térmica SAGD / Paul Richard Ramírez Perdomo ; orientador: Sérgio Arturo Barreto da Fontoura ; co-orientador: Cláudio Rabe. – 2009.

176 f. : il.(color.) ; 30 cm

Tese (Doutorado em Engenharia Civil)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Simulação de reservatórios. 3. Recuperação térmica de óleo. 4. Drenagem gravitacional assistida por vapor (SAGD). 5. Geomecânica. 6. Física de rochas. 7. Substituição de fluidos pela Equação de Gassmann. 8. Modelagem sísmica. I. Fontoura, Sérgio Arturo Barreto da. II. Rabe, Cláudio. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

Ao meu orientador, o Prof. Dr. Sérgio Arturo Barreto da Fontoura pela orientação e apoio concedido durante o doutorado.

Ao meu co-orientador, o Dr. Cláudio Rabe e a Schlumberger pela oportunidade de trabalhar na área de recuperação térmica de óleos pesados e pelo apoio na parte geomecânica de reservatório de óleos pesados.

Ao geofísico, o Dr. Fredy Alex Villaorduña Artola pela sua valiosa contribuição na parte geofísica.

À minha família pelo apoio que sempre me brindaram.

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil.

À secretária do Departamento da Engenharia Civil, Rita de Cássia pela ajuda na parte administrativa.

Aos meus colegas do GTEP: Olga Garcia, Julio Laredo, Lênin Guerrero, Noelia Valderrama, Vivian Marchesi e os funcionários de informática.

Aos meus companheiros da posgraduação do Departamento de Engenharia Civil.

À Agência Nacional do Petróleo (ANP) pelo apoio financeiro.

Resumo

Perdomo, Paul Richard Ramírez Perdomo; Fontoura, Sérgio. **Estudo Integrado de Sísmica 4D, Geomecânica e Simulação de Reservatórios Aplicado a Processos de Recuperação Térmica SAGD**. Rio de Janeiro, 2009. 175p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro.

As reservas de óleos pesados têm obtido grande importância devido à diminuição das reservas de óleos leves e ao aumento dos preços do petróleo. Porém, precisa-se de aumentar a viscosidades destes óleos pesados para que possam fluir até superfície. Para reduzir a viscosidade foi escolhida a técnica de recuperação térmica SAGD (Steam Assisted Gravity Drainage) pelos seus altos valores de recobro. A redução da viscosidade é atingida pela transmissão de calor ao óleo pela injeção de vapor, porém uma parte deste calor é transmitida à rocha. Esta transmissão de calor junto com a produção de óleo geram uma variação no estado de tensões no reservatório o que por sua vez geram fenômenos geomecânicos. Os simuladores convencionais avaliam de uma forma muito simplificada estes fenômenos geomecânicos, o que faz necessários uma abordagem mais apropriada que acople o escoamento dos hidrocarbonetos e a transmissão de calor com a deformação da rocha. As mudanças no reservatório, especialmente a variação da saturação, afetam as propriedades sísmicas da rocha, as quais podem ser monitoradas para acompanhar o avanço da frente de vapor. A simulação fluxo-térmica-composicional-geomecânica é integrada à sísmica de monitoramento 4D da injeção de vapor (a través da física de rochas). Existe uma grande base de dados, integrada por propriedades dos fluidos do reservatório (PVT) (usado no arquivo de entrada de simulação de fluxo) e uma campanha de mecânica das rochas. Foram simulados vários cenários geomecânicos considerando a plasticidade e variação da permeabilidade. Foram avaliadas várias repostas geomecânicas e de propriedades de fluidos no pico de pressão e final do processo SAGD. A resposta geomecânica pode ser observada, porém foi minimizada devido à baixa pressão de injeção, sendo o mecanismo de transmissão de calor um fator importante na produção de óleo (pela redução da viscosidade) e a separação vertical entre poços. Foi também significativa a contribuição da plasticidade no aumento da produção de hidrocarbonetos. A impedância acústica foi calculada usando a Equação de substituição de fluidos de Gassmann. Os sismogramas sintéticos de incidência normal (para monitorar o avanço da frente o câmara de vapor) mostraram a área afetada pela injeção de vapor, porém com pouca variação devida principalmente à rigidez da rocha.

Palavras chaves

Simulação de reservatórios, recuperação térmica de óleo, drenagem gravitacional assistida por vapor (SAGD), geomecânica, física de rochas, substituição de fluidos pela Equação de Gassmann, modelagem sísmica.

Abstract

Perdomo, Paul Richard Ramírez; Fontoura, Sérgio (Advisor). **4D Seismic, Geomechanics and Reservoir Simulation Integrated Study Applied to SAGD Thermal Recovery**. Rio de Janeiro, 2009. 175p. DSc. Thesis – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro.

The heavy oil reserves have gained importance due to the decreasing of the present light oil reserves. Although it is necessary to reduce the oil viscosity and makes it flows to surface. For its high recovery factor the SAGD (Steam Assited Gravity Drainage) thermal process was selected. The viscosity reduction is achieved by heat transfer from steam to oil, but some some part of this heat goes to rock frame. This heat transfer together with oil production change the initial in-situ stress field what creates geomechanical effects. The conventional flux simulators have a very simplified approach of geomechanical effects, so it is necessary to consider a more suitable approach that considers the coupling between oil flux and heat transfer with rock deformation. The changes within the reservoir, specially the saturation change, affect the seismical rock properties which can be used to monitor the steam chamber growth. The flux-thermal-geomechanics is integrated to steam chamber monitoring 4D seismic (through the rock physics). There is a great data base, integrated by reservoir fluid properties (PVT) (used in reservoir simulation dataset) and a rock mechanics campaign. Several scenaries were simulated considering the plasticity and permeability variation. Several geomechanical responses and flux properties at peak pressure and end of SAGD process were evaluated. The geomechanical response can be observed, but was minimized due to low steam injection pressure, being the heat transfer an important in oil production (for the viscosity reduction) and the vertical well separation, too. The plasticity has a significant contribution in the increment of oil production. Acoustic impedance was calculated by using Gassmann fluid substitution approach. 2D Synthetic seismograms, normal incidence (to monitor the steam camera front advance), showed the area affected by steam injection, but with little variation due principally to rock stiffness.

Key words

Reservoir simulation, thermal oil recovery, steam assisted gravity drainage (SAGD), geomechanics, rock physics, Gassmann's fluid substitution, seismic modeling

Sumário

1	Introdução	22
1.1.	Definição do problema	22
1.2.	Importância do problema	23
1.3.	Objetivo geral	23
1.4.	Contribuição	24
1.5.	Pacotes numéricos a serem usados	25
1.6.	Descrição	25
2	Revisão bibliográfica	27
2.1.	Processo de recuperação térmica SAGD	27
2.2.	Revisão sobre modelos geomecânicos aplicados ao SAGD usados em simuladores	30
2.2.1.	Acoplamento fluxo-térmico-geomecânico em modelos de reservatórios	30
2.2.2.	Modelos constitutivos para reservatórios deformáveis de óleos pesados	43
2.2.3.	Modelagem sísmica	46
3	Estudo Geológico da Faja del Orinoco	52
3.1.	Projeto Orinoco	52
3.1.1.	Caracterização geológica da Faja del Orinoco	53
4	Modelagem de fluxo	63
4.1.	Modelo numérico	63
4.2.	Construção do modelo de fluxo-térmico-geomecânico	64
4.3.	Resultados geomecânicos, propriedades dos fluidos, curvas de produção	71
4.3.1.	Propriedades geomecânicas e de fluidos para a formação mais resistente e menos compressiva com espaçamento vertical entre poços de 14, 28 e 42 ft	73
4.3.2.	Propriedades geomecânicas e de fluidos para a formação menos resistente e mais compressiva com espaçamento vertical entre poços de 14, 28 e 42 ft	94
4.3.3.	Interpretação dos resultados geomecânicos e propriedades dos fluidos	118
4.3.4.	Curvas de produção e pressão do reservatório	122
5	Modelagem sísmica	136

5.1. Variação da impedância acústica	138
5.1.1. Variação absoluta da impedância acústica para a rocha mais resistente e menos compressiva	138
5.1.2. Variação absoluta da impedância acústica para a rocha menos resistente e mais compressiva	142
5.1.3. Variação porcentual da impedância acústica para a rocha mais resistente e menos compressiva	145
5.1.4. Variação porcentual da impedância acústica para a rocha menos resistente e mais compressiva	149
5.1.5. Variação absoluta da impedância acústica entre a rocha mais resistente e menos compressiva e a menos resistente e mais compressiva	152
5.2. Sismogramas sintéticos	156
5.2.1. Sismogramas sintéticos para a rocha mais resistente e menos compressiva	157
5.2.2. Sismogramas sintéticos para a rocha menos resistente e mais compressiva	160
6 . Conclusões	164
7 Recomendações	166
8 Bibliografia referenciada	167
Apêndice A Arquivo de entrada para o cálculo da substituição de fluidos	172

Lista de figuras

Figura 2.1. Desenho do processo SAGD. (www.encana.com).....	28
Figura 2.2. Esquema de Drenagem Gravitacional Assistida por Vapor (SAGD) (Butler <i>et al.</i> 1981)	29
Figura 2.3. Possíveis trajetórias de tensões no reservatório durante o processo SAGD (Li and Chalaturnyk, 2004)	32
Figura 2.4. Comparação entre as envoltórias para todas as amostras de areia a duas temperaturas diferentes. (Vásquez <i>et al.</i> 1999).	36
Figura 2.5 Unidade de compactação vs pressão de poro (Vasquez <i>et al.</i> 1999)	37
Figura 2.6. Medição do coeficiente de expansão térmica com diminuição da temperatura. (Vasquez <i>et al.</i> 1999)	38
Figura 2.7. Medição do coeficiente de expansão térmica com aumento da temperatura. (Vasquez <i>et al.</i> 1999)	38
Figura 2.8. Velocidade da onda cisalhante como uma função da tensão normal octaédrica para uma porosidade entre 0,4 e 0,44 (Vasquez <i>et al.</i> 1999).	39
Figura 2.9. Incremento da permeabilidade com a dilatância (Collins, 2002).....	40
Figura 2.10. Acoplamento explícito. (Minkoff <i>et al.</i> 2004).....	42
Figura 2.11. Acoplamento iterativo. (Tran D. <i>et al.</i> , 2002).....	43
Figura 2.12. Curva de tensão-deformação hiperbólica (Ibañez, 2003)	46
Figura 2.13. Efeito do fluido de saturação em rochas nas velocidades de onda compressional e cisalhante (Wang e Nur, 1998)	47
Figura 2.14. Velocidades compressionais em função da temperatura (Eastwood, 1993).....	48
Figura 2.15. Mapa de diferenças de amplitudes entre 2001 e 2004 (a) e 2001 e 2005 (b) (Zang <i>et al.</i> 2007)	50
Figura 2.16. Sísmica 4D entre 2001 e 2005 no final dos poços A1, A2, A3 e A4 (Zang <i>et al.</i> 2007)	51
Figura 2.17. Variação no <i>time-shift</i> devida à compactação do reservatório (Røste, 2007).....	51
Figura 3.1. Óleo original <i>in-situ</i> e reservas provadas na Faja del Orinoco. (www.pdvsa.com)	52
Figura 3.2. Localização geográfica da Faja del Orinoco. (www.slb.com)	54
Figura 3.3. Carta de correlação estratigráfica das formações do Terciário na Faja del Orinoco (Fiorillo, 1983).....	56

Figura 3.4. Desenho dos elementos paleoestratigráficos que controlaram a sedimentação das Unidades I, II e III da seqüência Oligoceno-Mioceno. (Fiorillo, 1983).....	57
Figura 3.5. Mapa paleográfico da distribuição deltaica da Unidade Oligoceno-Mioceno. Ao sul existe uma área positiva atravessada por rios fluindo de norte ao sul. (Fiorillo, 1983).....	58
Figura 3.6. Bacias petrolíferas venezuelanas com base na suas províncias sedimentos. E.B.L. El Baul Linement, limite das bacias Este e Barinas-Apure. (Well Evaluation Conference, 1997).....	59
Figura 3.7. Definições estratigráficas gerais para a Faja del Orinoco. (Dusseault, 2006).....	61
Figura 4.1. Modelo geomecânico	63
Figura 4.2. Condições de contorno do modelo do reservatório e sistema de eixos e número de células em cada eixo	69
Figura 4.3. Espaçamento vertical entre poços	70
Figura 4.4. Fluxo de trabalho.....	71
Figura 4.5. Pontos de leitura para o espaçamento vertical entre poços de 14 ft.	72
Figura 4.6. Pontos de leitura para o espaçamento vertical entre poços de 28 ft.	72
Figura 4.7. Pontos de leitura para o espaçamento vertical entre poços de 42 ft.	73
Figura 4.8. Variação de esforços no plano horizontal para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 14 ft	74
Figura 4.9. Variação da tensão cisalhante para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 14 ft	74
Figura 4.10. Variação da pressão para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 14 ft	75
Figura 4.11. Variação do deslocamento no eixo Z para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 14 ft	76
Figura 4.12. Variação da saturação de óleo para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 14 ft	76
Figura 4.13. Variação da saturação de gás para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 14 ft	77
Figura 4.14. Variação da deformação cisalhante para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 14 ft	78
Figura 4.15. Variação da deformação vertical para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 14 ft	78
Figura 4.16. Variação da temperatura para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 14 ft	79

Figura 4.17. Tensão principal máxima (a) e mínima (b) para o abandono.....	80
Figura 4.18. Variação de esforços no plano horizontal para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 28 ft.....	81
Figura 4.19. Variação da tensão cisalhante para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 28 ft.....	81
Figura 4.20. Variação da pressão para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 28 ft.....	82
Figura 4.21. Variação do deslocamento no eixo Z para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 28 ft.....	83
Figura 4.22. Variação da saturação de óleo para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 28 ft.....	83
Figura 4.23. Variação da saturação de gás para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 28 ft.....	84
Figura 4.24. Variação da deformação cisalhante para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 28 ft.....	85
Figura 4.25. Variação da deformação vertical para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 28 ft.....	85
Figura 4.26. Variação da temperatura para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 28 ft.....	86
Figura 4.27. Tensão principal máxima (a) e mínima (b) para o abandono.....	87
Figura 4.28. Variação de esforços no plano horizontal para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 42 ft.....	88
Figura 4.29. Variação da tensão cisalhante para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 42 ft.....	88
Figura 4.30. Variação da pressão para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 42 ft.....	89
Figura 4.31. Variação do deslocamento no eixo Z para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 42 ft.....	90
Figura 4.32. Variação da saturação de óleo para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 42 ft.....	90
Figura 4.33. Variação da saturação de gás para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 42 ft.....	91
Figura 4.34. Variação da deformação cisalhante para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 42 ft.....	92
Figura 4.35. Variação da deformação vertical para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 42 ft.....	92

Figura 4.36. Variação da temperatura para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 42 ft	93
Figura 4.37. Tensão principal máxima (a) e mínima (b) para o abandono	94
Figura 4.38. Variação de esforços no plano horizontal para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 14 ft.....	95
Figura 4.39. Variação da tensão cisalhante para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 14 ft	95
Figura 4.40. Variação da pressão para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 14 ft	96
Figura 4.41. Variação do deslocamento no eixo Z para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 14 ft	97
Figura 4.42. Variação da saturação de óleo para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 14 ft	97
Figura 4.43. Variação da saturação de gás para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 14 ft	98
Figura 4.44. Variação da deformação cisalhante para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 14 ft	99
Figura 4.45. Variação da deformação vertical para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 14 ft	99
Figura 4.46. Variação da temperatura para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 14 ft	100
Figura 4.47. Tensão principal máxima (a) e mínima (b) para o abandono	101
Figura 4.48. Variação de esforços no plano horizontal para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 28 ft.....	102
Figura 4.49. Variação da tensão cisalhante para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 28 ft	102
Figura 4.50. Variação da pressão para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 28 ft	103
Figura 4.51. Variação do deslocamento no eixo Z para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 28 ft	104
Figura 4.52. Variação da saturação de óleo para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 28 ft	104
Figura 4.53. Variação da saturação de gás para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 28 ft	105
Figura 4.54. Variação da deformação cisalhante para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 28 ft	106

Figura 4.55. Variação da deformação vertical para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 28 ft	106
Figura 4.56. Variação da temperatura para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 28 ft	107
Figura 4.57. Tensão principal máxima (a) e mínima (b) para o abandono	108
Figura 4.58. Variação de esforços no plano horizontal para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 42 ft.....	109
Figura 4.59. Variação da tensão cisalhante para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 42 ft	109
Figura 4.60. Variação da pressão para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 42 ft	110
Figura 4.61. Variação do deslocamento no eixo Z para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 42 ft	111
Figura 4.62. Variação da saturação de óleo para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 42 ft	111
Figura 4.63. Variação da saturação de gás para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 42 ft	112
Figura 4.64. Variação da deformação cisalhante para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 42 ft	113
Figura 4.65. Variação da deformação vertical para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 42 ft	113
Figura 4.66. Variação da temperatura para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 42 ft	114
Figura 4.67. Tensão principal máxima (a) e mínima (b) para o abandono	115
Figura 4.68. Efeito do modelo <i>yield</i> (escoamento) e da variação da permeabilidade na produção acumulada de óleo para a rocha mais resistente	124
Figura 4.69. Efeito do modelo <i>yield</i> (escoamento) e da variação da permeabilidade na pressão do reservatório para a rocha mais resistente	126
Figura 4.70. Efeito do modelo <i>yield</i> (escoamento) e da variação da permeabilidade na produção acumulada de óleo para a rocha menos resistente	128
Figura 4.71. Efeito do modelo <i>yield</i> (escoamento) e da variação da permeabilidade na pressão do reservatório para a rocha menos resistente	130

Figura 4.72. Efeito do modelo <i>yield</i> (escoamento) e da variação da permeabilidade na produção acumulada de óleo para a rocha mais e menos resistente	132
Figura 4.73. Efeito do modelo <i>yield</i> (escoamento) e da variação da permeabilidade na pressão média do reservatório para a rocha mais e menos resistente	133
Figura 4.74. Efeito da rotação de tensões <i>in-situ</i> na produção acumulada de óleo para a rocha mais resistente com modelo <i>yield</i> (escoamento) e separação vertical entre poços de 42 ft.....	134
Figura 4.75. Produção acumulada de óleo para diferentes espaçamentos verticais entre poços.....	134
Figura 5.1. Variação da impedância acústica ($\text{gm/cm}^3\cdot\text{m/s}$) e temperatura ($^{\circ}\text{F}$) após 9 anos de injeção de vapor para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 14 ft.....	139
Figura 5.2. Secções horizontais da (a) Impedância acústica e (b) Variação da impedância acústica após 9 anos de injeção de vapor para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 14 ft.....	139
Figura 5.3. Variação da impedância ($\text{gm/cm}^3\cdot\text{m/s}$) acústica e temperatura ($^{\circ}\text{F}$) após 9 anos de injeção de vapor para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 28 ft.....	140
Figura 5.4. Secções horizontais da (a) Impedância acústica e (b) Variação da impedância acústica após 9 anos de injeção de vapor para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 28 ft.....	140
Figura 5.5. Variação da impedância acústica ($\text{gm/cm}^3\cdot\text{m/s}$) e temperatura ($^{\circ}\text{F}$) após 9 anos de injeção de vapor para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 42 ft.....	141
Figura 5.6. Secções horizontais da (a) Impedância acústica e (b) Variação da impedância acústica após 9 anos de injeção de vapor para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 42 ft.....	141
Figura 5.7. Variação da impedância acústica ($\text{gm/cm}^3\cdot\text{m/s}$) e temperatura ($^{\circ}\text{F}$) após 9 anos de injeção de vapor para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 14 ft.....	142
Figura 5.8. Secções horizontais da (a) Impedância acústica e (b) Variação da impedância acústica após 9 anos de injeção de vapor para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 14 ft.....	142

Figura 5.9. Variação da impedância ($\text{gm/cm}^3 \cdot \text{m/s}$) acústica e temperatura ($^{\circ}\text{F}$) após 9 anos de injeção de vapor para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 28 ft	143
Figura 5.10. Secções horizontais da (a) Impedância acústica e (b) Variação da impedância acústica após 9 anos de injeção de vapor para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 28 ft.....	143
Figura 5.11. Variação da impedância acústica ($\text{gm/cm}^3 \cdot \text{m/s}$) e temperatura ($^{\circ}\text{F}$) após 9 anos de injeção de vapor para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 42 ft	144
Figura 5.12. Secções horizontais da (a) Impedância acústica e (b) Variação da impedância acústica após 9 anos de injeção de vapor para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 42 ft.....	144
Figura 5.13. Variação porcentual da impedância acústica ($\text{gm/cm}^3 \cdot \text{m/s}$) após 9 anos de injeção de vapor para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 14 ft.....	145
Figura 5.14. Variação porcentual da impedância acústica ($\text{gm/cm}^3 \cdot \text{m/s}$) após 9 anos de injeção de vapor para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 28 ft.....	146
Figura 5.15. Variação porcentual da impedância acústica ($\text{gm/cm}^3 \cdot \text{m/s}$) após 9 anos de injeção de vapor para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 42 ft.....	147
Figura 5.16. Histogramas da variação porcentual da impedância acústica para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical de (a) 14 ft, (b) 28 e (c) 42 ft.....	148
Figura 5.17. Variação porcentual da impedância acústica ($\text{gm/cm}^3 \cdot \text{m/s}$) após 9 anos de injeção de vapor para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 14 ft.....	149
Figura 5.18. Variação porcentual da impedância acústica ($\text{gm/cm}^3 \cdot \text{m/s}$) após 9 anos de injeção de vapor para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 28 ft.....	150
Figura 5.19. Variação porcentual da impedância acústica ($\text{gm/cm}^3 \cdot \text{m/s}$) após 9 anos de injeção de vapor para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 42 ft.....	151
Figura 5.20. Histogramas da variação porcentual da impedância acústica para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical de (a) 14 ft, (b) 28 e (c) 42 ft.....	152

Figura 5.21. Variação da impedância acústica ($\text{gm/cm}^3 \cdot \text{m/s}$) após 9 anos de injeção de vapor entre a rocha mais resistente e menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 14 ft	153
Figura 5.22. Variação da impedância acústica ($\text{gm/cm}^3 \cdot \text{m/s}$) após 9 anos de injeção de vapor entre a rocha mais resistente e menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 28 ft	154
Figura 5.23. Variação da impedância acústica ($\text{gm/cm}^3 \cdot \text{m/s}$) após 9 anos de injeção de vapor entre a rocha mais resistente e menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 42 ft	155
Figura 5.24. Histogramas dos valores de diferenças na impedância acústica absoluta entre a rocha mais resistente e a menos resistente para espaçamento vertical entre poços: (a) 14 ft, (b) 28 e (c) 42 ft	155
Figura 5.25. Representação da sobrecarga, reservatório e <i>underburden</i>	156
Figura 5.26. Sismogramas sintéticos para a Base e Monitor após a injeção vapor por 9 anos para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 14 ft	157
Figura 5.27. Sismogramas sintéticos para a Base e Monitor após a injeção vapor por 9 anos para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 28 ft	158
Figura 5.28. Sismogramas sintéticos para a Base e Monitor após a injeção vapor por 9 anos para a rocha mais resistente e um espaçamento vertical entre poços de 42 ft	159
Figura 5.29. Sismogramas sintéticos para a Base e Monitor após a injeção vapor por 9 anos para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 14 ft	160
Figura 5.30. Sismogramas sintéticos para a Base e Monitor após a injeção vapor por 9 anos para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 28 ft	161
Figura 5.31. Sismogramas sintéticos para a Base e Monitor após a injeção vapor por 9 anos para a rocha menos resistente e um espaçamento vertical entre poços de 42 ft	162

Lista de tabelas

Tabela 2.1. Propriedades físicas dos reservatórios dos três modelos (Li e Chalaturnyk, 2004)	33
Tabela 2.2. Parâmetros requeridos para a análise geomecânica (Li e Chalaturnyk, 2004)	34
Tabela 4.1. Análise de sensibilidade	67
Tabela 4.2. Multiplicadores de permeabilidade em função das tensões principal máxima e mínima.....	67
Tabela 4.3. Parâmetros do reservatório.	68
Tabela 4.4. Resultados de diferentes parâmetros geomecânicos e de fluido para a rocha mais resistente e menos compressiva e um espaçamento vertical entre poços de 14, 28 e 42 ft	115
Tabela 4.5. Resultados de diferentes parâmetros geomecânicos e de fluido para a rocha menos resistente e mais compressiva e um espaçamento vertical entre poços de 14, 28 e 42 ft	116
Tabela 5.1 Condições iniciais para a substituição de Fluidos pela Equação de Gassmann	138

Lista de símbolos

a, b	Parâmetros de endurecimento da curva tensão-deformação hiperbólica
b_1	Coefficiente de ajuste linear da curva de tensão principal máxima e mínima
c	Coesão do material
C_b	Compressibilidade total
C_o	Resistência coesiva cisalhante
C_r	Compressibilidade da matriz da rocha
δA	Variação do parâmetro A
$[D]$	Matriz de acumulação
ε_b	Deformação volumétrica
ε_{ij}^p	Vetor de deformação plástica
$\bar{\varepsilon}_p$	Deformação plástica generalizada
ε_{yz}	Variação da deformação cisalhante
ε_{zz}	Variação da deformação vertical
F	Normal do tensor de tensões
F_f	Função fonte
$FOPT$	Produção total de óleo
FPR	Pressão média do reservatório
$HCPV$	Volume poroso do hidrocarboneto
IA	Impedância acústica
$[K]$	Matriz de rigidez
K_{clay}	Módulo de incompressibilidade da argila
K_{fl}	Módulo de incompressibilidade do fluido saturante
K_{frame}	Módulo de incompressibilidade da matriz rochosa
K_{matrix}	Módulo de incompressibilidade dos grãos
K_{qtz}	Módulo de incompressibilidade do quartzo
K_{sat}	Módulo de incompressibilidade da rocha saturada

m	Coeficiente de ajuste linear
μ_{sat}	Módulo cisalhante da rocha saturada
ϕ	Ângulo de atrito interno da rocha
P	Pressão
\vec{Q}	Vetor das condições de contorno
R	Refletividade
ρ_{fl}	Densidade do fluido saturante
ρ_{matrix}	Densidade dos grãos
ρ_{sat}	Densidade da rocha saturada
σ	Tensão normal
σ_{ij}	Tensor de tensões efetivas
σ'_{yy}	Varição de esforços no plano horizontal
σ_{yz}	Varição da tensão cisalhante
σ_1	Tensão principal máxima
σ_3	Tensão principal mínima
S_{gi}	Saturação de gás inicial
S_{oi}	Saturação de óleo inicial
S_{wi}	Saturação de água inicial
S_o	Varição da saturação de óleo
S_g	Varição da saturação de gás
τ	Tensão cisalhante normal
$[T]$	Matriz de transmissibilidade simétrica
T	Temperatura
T_s	Traço sísmico
U_z	Varição do deslocamento no eixo Z
V_{clay}	Volume de folhelho
V_p	Velocidade da onda compressional
V_{qtz}	Volume de quartzo
V_s	Velocidade da onda cisalhante

Substituição de Fluidos

ϕ Porosidade