José Roberto Silvestre

**Análise numérica de estabilidade
de poços de petróleo
com relevância a produção de areia**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de Concentração: Geotecnia

Orientadores: Eurípedes do Amaral Vargas Jr.
João Luiz Elias Campos

Rio de Janeiro, março de 2004.

José Roberto Silvestre

Análise numérica de estabilidade de poços de petróleo com relevância a produção de areia

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

Eurípedes do Amaral Vargas Jr.
Orientador
PUC/Rio

João Luiz Elias Campos
TecGraf

Luiz Fernando Campos Ramos Martha
PUC/Rio

Aldo Durand Fáfán
UENF

José Eugênio Leal
Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 12 de março de 2004

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

José Roberto Silvestre

Graduado em Engenharia Civil, pela UFJF - Universidade Federal de Juiz de Fora, em 2000.

Ficha Catalográfica

Silvestre, José Roberto

Análise numérica de estabilidade de poços de petróleo com relevância a produção de areia / José Roberto Silvestre; orientadores: Eurípedes do Amaral Vargas Jr; João Luiz Elias Campos. - Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2004.

v., 133f.: il. ; 29,7 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Civil - Teses. 2. Produção de areia. 3. Modelo elastoplástico Lade-Kim. 4. Mecanismos de ruptura. I. Vargas Jr., Eurípedes do Amaral. II. Campos, João Luiz Elias. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 6.24

A meus pais,
A minha família,
por terem confiado em mim.

Agradecimentos

A meus pais Luís e Ana, pela atenção, carinho e ensinamentos sem os quais eu não teria chegado aqui.

Ao Professor Eurípedes do Amaral Vargas Jr., pela paciência, confiança depositada, orientação, estímulo e conhecimento transmitido neste convívio.

Ao meu co-orientador João Luiz pela participação em momentos decisivos da dissertação.

A Armando Prestes, Raquel Veloso, Aldo, Rodrigo Peluci e Sergio Montoya que, de alguma forma, contribuíram nesta dissertação.

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil da PUC - Rio.

A todos os amigos, pela amizade e apoio nas horas difíceis, especialmente aos das salas 317 e 609.

A todos os funcionários da PUC.

A PUC e a Capes pelos recursos financeiros a pesquisa.

A minha família pelo incentivo e apoio que me deram.

Resumo

Silvestre, José Roberto; Vargas Jr., Eurípedes do Amaral; Campos, João Luiz Elias. **Análise numérica de estabilidade de poços de petróleo com relevância a produção de areia.** Rio de Janeiro, 2004. 133p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho visa simular situações que levam uma rocha a ruptura considerando o fluxo de fluidos, em uma tentativa de correlacionar os mecanismos envolvidos na ruptura ao processo conhecido como produção de areia em rochas reservatório, ou seja, a produção de sólidos durante a extração de hidrocarbonetos. Há algum tempo este assunto tem sido tratado do ponto de vista da mecânica das rochas dada a similaridade do seu comportamento com outros fenômenos estudados nesta área.

Como se trata de um processo de extração de fluidos, a sua influência deve ser considerada no comportamento mecânico da rocha. Assim, simulações numéricas, representativas de situações favoráveis a este fenômeno, foram analisadas, utilizando-se, para tal, o programa comercial de elementos finitos ABAQUS, que permite a simulação do processo de acoplamento fluido mecânico.

Dada a flexibilidade demonstrada pelo pacote numérico, possibilitou-se a implementação de um modelo elastoplástico e a verificação de sua eficiência na representação do comportamento da rocha reservatório neste processo. A implementação numérica baseou-se no conhecido modelo de Lade-Kim. Este modelo é apropriado à descrição do comportamento de materiais geomecânicos granulares. Trabalhos experimentais em paralelo procuram determinar os parâmetros do modelo de Lade – Kim. Estes parâmetros são usados na análise numérica.

Palavras-chave

Produção de areia; Modelo elastoplástico Lade – Kim; Mecanismos de ruptura.

Abstract

Silvestre, José Roberto; Vargas Jr., Eurípedes do Amaral (advisor); Campos, João Luiz Elias (advisor). **Numerical analysis of wells with relevance for sand production.** Rio de Janeiro, 2004. 133p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work aims to simulate situations that take a rock the rupture considering the fluid flow, in an attempt to correlate the involved mechanisms in the rupture to the know process as sand production in rocks reservoir, that is, solid production during hydrocarbon extraction.

Numerical simulations using the commercial finite element program ABAQUS, reproduce fluid-mechanical coupling, and allowing the implementation of an elastoplastic rock material behavior.

More precisely, the author implemented a numerical routine based on the well-known Lade-Kim elastoplastic model, which can suitably describe the behavior of geomaterials subjected to external stress-strain fields.

Palavras-chave

Sand production; Lade – Kim elastoplastic model; Failure mechanisms.

Sumário

1 Introdução	22
2 Produção de areia em poços de petróleo	25
2.1. Introdução	25
2.2. Mecanismos de produção de areia	31
3 Análise numérica de problemas a poroelasticidade	36
3.1. Introdução	36
3.2. Teoria da poroelasticidade de Biot	36
3.2.1. Equações de equilíbrio	37
3.2.2. Relação deformação – deslocamento	37
3.2.3. Relação tensão – deformação	37
3.2.4. Equações governantes	39
3.2.5. Análise de problemas de poroelasticidade pelo programa ABAQUS	40
3.2.6. Exemplos de validação	43
3.2.6.1. Adensamento unidimensional	43
3.2.6.2. Poço vertical em um estado de tensões não hidrostático	49
3.2.6.2.1. Carregamento modo 1	50
3.2.6.2.2. Carregamento modo 2	51
3.2.6.2.3. Carregamento modo 3	51
3.2.6.3. Solução para a inversa da transformada de Laplace	56
4 Modelo constitutivo implementado	58
4.1. Critérios da Plasticidade	58
4.1.1. Critério de escoamento	59
4.1.2. Leis de evolução para endurecimento–amolecimento	59
4.1.3. Lei de Fluxo	61
4.2. Modelo Lade - Kim	62

4.2.1. Comportamento elástico	62
4.2.2. Critério de ruptura	63
4.2.3. Função potencial plástica	64
4.2.4. Função de escoamento	67
4.3. Modelo de Mohr–Coulomb	70
4.3.1. Critério de ruptura	70
4.3.2. Função de escoamento	71
4.3.3. Função potencial plástica	72
5 Algoritmo para integração da relação tensão–deformação	74
5.1. Algoritmo do tipo explícito	76
5.2. Relações usadas no processo de integração	83
5.3. Detalhes da implementação numérica	87
5.4. Comparação entre ensaios de laboratório e simulação numérica	88
6 Análise da estabilidade de poços hipotéticos	93
6.1. Poço no arenito Rio Bonito	95
6.1.1. Estimativa da produção de sólidos	105
6.2. Poço hipotético no Calcário do Campo de Congro	107
6.2.1. Permeabilidade constante	107
6.2.2. Permeabilidade variável	115
6.2.3. Comparações entre os resultados obtidos utilizando os critérios de Mohr–Coulomb e Lade-Kim	120
7 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	126
8 Referências Bibliográficas	129

Lista de figuras

Figura 2.01 – Produção de areia a nível microscópico (Dusseault e Santarelli, 1989)	26
Figura 2.02 - Esquema da completação de um poço (Fjaer e outros, 1992)	27
Figura 2.03 – Tensão vertical efetiva próxima ao poço versus pressão de colapso em um TWC (Veeken e outros, 1991).	30
Figura 2.04 - Dano de arenito brando durante o canhoneio (Dusseault e Santarelli, 1989)	32
Figura 2.05 - Comparação de ensaios triaxiais com a ruptura de cavidades (Morita, 1994)	33
Figura 2.06 – Diagrama simplificado da envoltória de ruptura de cavidade proposto por Morita (1987)	34
Figura 3.01 – Esquema da coluna poroelástica	44
Figura 3.02 – Deslocamento no topo da coluna com o tempo - $\alpha = 0.62$	46
Figura 3.03 – Deslocamento no topo da coluna com o tempo - $\alpha = 1$	46
Figura 3.04 – Excesso de poropressão na base da coluna com o tempo - $\alpha = 0.62$	47
Figura 3.05 - Excesso de poropressão na base da coluna com o tempo - $\alpha = 1$	47
Figura 3.06 – Excesso de poropressão ao longo da coluna - $\alpha = 0.62$	48
Figura 3.07 - Excesso de poropressão ao longo da coluna - $\alpha = 1$	48
Figura 3.08 – Esquema de um poço em um meio poroelástico	50
Figura 3.09 – malha de elementos finitos utilizada na simulação do poço.	53
Figura 3.10 – Poropressão ao longo da direção $\theta = 0$ - $\alpha = 0.62$	53
Figura 3.11 – Poropressão ao longo da direção $\theta = 0$ - $\alpha = 1$	53

Figura 3.12 – Tensão tangencial ao longo da direção $\theta = 0$ - $\alpha = 0.62$	54
Figura 3.13 – Tensão tangencial ao longo da direção $\theta = 0$ - $\alpha = 1$	54
Figura 3.14 – Tensão radial ao longo da direção $\theta = 0$ - $\alpha = 0.62$	55
Figura 3.15 – Tensão radial ao longo da direção $\theta = 0$ - $\alpha = 1$	55
Figura 4.01 – Representação da superfície de escoamento no plano desviador (Desai, 1984).	60
Figura 4.02 – Superfície de ruptura do modelo Lade–Kim no plano triaxial e octaédrico (Lade e Kim, 1988).	64
Figura 4.03 – Superfície potencial plástica do modelo Lade – Kim (Lade e Kim, 1988)	65
Figura 4.04 – Dados experimentais e contornos de trabalho plástico constante no plano octaédrico para <i>Fuji River Sand</i> (Lade e Kim, 1988).	68
Figura 4.05 – Função de escoamento no endurecimento e amolecimento (Lade e Kim, 1988).	70
Figura 4.06 – Fluxo potencial plástico pela função de Menétrey e Willam no plano desviador (Willam e Menetrey, 1995).	73
Figura 5.01 – Interpretação gráfica da solução proposta por Euler (Boyce e Diprima, 1998)	77
Figura 5.02 – Curva tensão versus deformação axial para a <i>fine sílica sand</i> .	89
Figura 5.03 - Curva deformação volumétrica versus deformação axial para a <i>fine sílica sand</i> .	89
Figura 5.04 - Curva tensão versus deformação axial para o arenito Rio Bonito.	90
Figura 5.05 - Curva deformação volumétrica versus deformação axial para o arenito Rio Bonito.	90
Figura 5.06 - Curva tensão versus deformação axial para o arenito Vila Velha.	91
Figura 5.07 – Curva deformação volumétrica versus deformação axial para o arenito Vila Velha.	91

- Figura 6.01 – Representação esquemática poço vertical a ser estudado 93
- Figura 6.02 - Malhas utilizadas na simulação, a esquerda a malha 1 e a direita a malha 2. 94
- Figura 6.03 – Campos de tensão principal maior na vizinhança do poço para os casos 1, 2 e 3 com *drawdown* de 2 MPa. A esquerda representa – se a escavação e a direita a utilização do poço. 97
- Figura 6.04 – Campos de tensão principal menor na vizinhança do poço para os casos 1, 2 e 3 e *drawdown* de 2 MPa. A esquerda representa –se a escavação e a direita a utilização do poço. 98
- Figura 6.05 – Distribuição da tensão principal maior na vizinhança do poço para os casos 3 e 4, ilustrando os gráficos sobre a escavação como indicado e os demais com o poço em produção. 99
- Figura 6.06 – Campos de tensão principal menor na vizinhança do poço para os casos 3 e 4. ilustrando os gráficos sobre a escavação como indicado e os demais com o poço em produção. 100
- Figura 6.07 - Zona rompida na vizinhança do poço para os casos 1, 2 e 3 e *drawdown* de 2 MPa. À esquerda está representada a escavação do poço e à direita o poço em produção. 101
- Figura 6.08 - Zona rompida na vizinhança do poço para os casos 3 e 4, ilustrando os gráficos sobre a escavação como indicado e os demais o poço em produção. 102
- Figura 6.09 – Campos de deformação volumétrica na vizinhança do poço para o caso 1. O primeiro gráfico representa a escavação como indicado e o seguintes o poço em produção. 103
- Figura 6.10 Curva tensão principal maior-raio adimensional e tensão principal menor-raio adimensional. 104
- Figura 6.11 - Indicador dos pontos de início da produção de sólidos. 106
- Figura 6.12 – Campo de tensão principal menor na vizinhança do poço para os casos 6 e 8 com *drawdown* de 5 Mpa. À esquerda representa–se a escavação e à direita a produção do poço. 108
- Figura 6.13 – Campo de tensão principal menor na vizinhança do poço

para os casos 5 e 7, ilustrando os gráficos sobre a escavação como indicado e os demais o poço em produção. 109

Figura 6.14 - Zona de ruptura na vizinhança do poço variando o estado de tensão e *drawdown* de 2 MPa. À esquerda representa –se a perfuração e à direita a utilização do poço. 110

Figura 6.15 - Zona rompida na vizinhança do poço variando o *drawdown* e um carregamento aplicado de $\sigma'_H = 40 \text{ MPa}$ e $\sigma'_h = 25 \text{ MPa}$. O primeiro gráfico representa a perfuração e os seguintes a utilização do poço. 111

Figura 6.16 – Campo de deformação volumétrica na direção $\theta = 0$ e $\theta = 45$ sob uma tensão horizontal maior de 40 e 45 MPa (carregamentos 6 e 8) e um *drawdown* de 5 MPa. 112

Figura 6.17 – Campo de deformação volumétrica na vizinhança do poço para os casos 6 e 8. À esquerda está representada a perfuração e à direita a utilização do poço. 113

Figura 6.18 – Campo de deformação volumétrica na vizinhança do poço para os casos 6 e 7, ilustrando os gráficos sobre a escavação como indicado e os demais o poço em produção. 114

Figura 6.19 - Zona rompida na vizinhança do poço para os casos 6 e 7. À esquerda está representada a escavação e à direita o poço em produção. 116

Figura 6.20 – Campo de deformação volumétrica na vizinhança do poço para os casos 6 e 7, ilustrando os gráficos sobre a escavação como indicado e o demais o poço em produção. 117

Figura 6.21 - Distribuição de poro – pressão para o caso 7 com *drawdown* de 10 MPa. A primeira ilustração considera a permeabilidade constante como indicado e a segunda a permeabilidade como função da porosidade. 118

Figura 6.22 – Curva deformação volumétrica-raio adimensional e permeabilidade-raio adimensional em duas direções na etapa de produção para o calcário do Campo de Congro 119

Figura 6.23 – Campo de deformação volumétrica na vizinhança do poço para os modelos de Mohr - Coulomb e Lade - Kim para o caso 7 com

um *drawdown* de 10 MPa. O gráfico a esquerda corresponde à escavação e a direita o poço em produção. 121

Figura 6.24 - Zona de ruptura na vizinhança do poço para o caso 7 e um *drawdown* de 10 MPa. O gráfico a esquerda corresponde à escavação e a direita o poço em produção. 122

Figura 6.25 – Distribuição do índice de vazios na vizinhança do poço para os modelos de Mohr-Coulomb e Lade-Kim para o caso 7 com um *drawdown* de 10 MPa. O gráfico a esquerda corresponde à escavação e a direita a utilização do poço. 123

Figura 6.26 - excesso de poropressão na vizinhança do poço para os modelos de Mohr-Coulomb e Lade-Kim com um *drawdown* de 10 MPa, mantendo um estado de tensão de $\sigma_H = 40 \text{ MPa}$ e $\sigma_h = 25 \text{ MPa}$. O primeiro gráfico corresponde ao modelo de Lade–Kim e o último o de Mohr – Coulomb. 124

Figura 6.27 – Simulação de ensaios uniaxial e triaxial de compressão para o modelo de Mohr – coulomb e Lade – Kim para o calcário do Campo de Congro. 125

Lista de Tabelas

Tabela 2.01 – Parâmetros que influenciam a produção de areia	28
Tabela 3.01 – Parâmetros poroelásticos do arenito de Berea (Detournay e Cheng, 1993)	45
Tabela 5.01 – Parâmetros do modelo Lade-Kim para a <i>fine sílica sand</i>	88
Tabela 5.02 – Parâmetros do modelo Lade-Kim para o arenito Vila Velha	88
Tabela 5.03 – Parâmetros do modelo Lade-Kim para o arenito Rio Bonito	88
Tabela 6.01 – Carregamento no contorno e pressão aplicada no poço e na formação para o arenito Rio Bonito.	96
Tabela 6.02 – Carregamento no contorno e pressão aplicada no poço e na formação para o arenito Rio Bonito.	107
Tabela 6.03 – Permeabilidade em função da porosidade (Soares, 2001)	115

Lista de símbolos

a	Parâmetros do critério de ruptura do modelo Lade – Kim
A	Constante da função de escoamento no amolecimento do modelo Lade – Kim
B	Coeficiente de Skempton
B^*	Constante da função de escoamento no amolecimento do modelo Lade – Kim
B'	Matriz de acoplamento
c	Coeficiente de difusividade
c^*	Coesão para o modelo de Mohr – Coulomb
C	Parâmetro da função de escoamento do modelo Lade – Kim
C_1, C_2 e C_3	Constantes auxiliares da solução de Detournay e Cheng
$c _0$	Coesão no início da plastificação
D	Matriz constitutiva elástica
D'	Parâmetro da função de escoamento do modelo Lade – Kim
dd	<i>Drawdown</i>
D_{ep}	Matriz constitutiva elastoplástica
D_1 e D_2	Constantes auxiliares da solução de Detournay e Cheng
dw_p	Incremento de trabalho plástico
$d\varepsilon$	Incremento de deformação total
$d\varepsilon^e$	Incremento de deformação elástica
$d\varepsilon^p$	Incremento de deformação plástica
$d\lambda$	Parâmetro plástico

e	Parâmetro relacionado a excentricidade
E	Módulo de Young
$\hat{E}_n$	Erro local
e_1	Excentricidade que descreve o contorno da função potencial plástica
f	Força de massa
f''	Função de escoamento em termos do trabalho plástico
F	Função de escoamento
F_a	Valor aproximado da função real no campo de Laplace
f_p	Função de escoamento em termos de tensão
g	Aceleração da gravidade
G	Módulo de cisalhamento
g_p	Função potencial plástica no modelo Lade – Kim
h	Parâmetro da função de escoamento do modelo Lade – Kim
H	Constante poroelástica
h'	Parâmetro de endurecimento
H'	Matriz de fluxo
I_1, I_2 e I_3	Primeiro, segundo e terceiro invariantes de tensão respectivamente
J	Taxa de volume do meio da sua configuração corrente para a configuração de referência
k	Permeabilidade
K	Módulo volumétrico do esqueleto sólido
$\hat{k}$	Permeabilidade do meio poroso
K'	Matriz de rigidez

k_s	Função que introduz a dependência da permeabilidade em relação a saturação
K_s	Módulo volumétrico dos grãos sólidos
K_{ur}	Parâmetros elásticos do modelo de Lade – Kim
K_0	Função de Bessel modificada de ordem zero
K_1	Função de Bessel modificada de ordem 1
L'	Matriz de acoplamento
m	Parâmetro do critério de ruptura do modelo Lade – Kim
n	Parâmetro elástico do modelo Lade – Kim
n'	Porosidade do meio
$\bar{n}$	Vetor normal à superfície S_1
n_t	Volume de fluido absorvido pelo meio poroso por unidade de volume
p	poropressão
P	Parâmetro da função de escoamento do modelo Lade – Kim
p'	Tensão equivalente
p^*	Carregamento aplicado no topo da coluna
p_0	Poropressão na formação
P_0	Tensão hidrostática
p_a	Pressão atmosférica
p_w	Pressão no poço
q	Parâmetro da função de escoamento do modelo Lade – Kim
Q	Função potencial plástica
q'	Tensão equivalente de Mises
$\bar{q}$	Constante que determina a variação do incremento no algoritmo de integração

Q'	Vetor de fluxo
Q_p	Constante poroelástica
r	Raio de um ponto qualquer na solução de Detournay e Cheng
R	Constante poroelástica
r'	Terceiro invariante de tensão desviadora
R'	Erro relativo
$R_{mc}(\Theta, \varphi)$	Medida da tensão desviadora
R_{mw}	Função desviadora elíptica
r_w	Raio do poço
s	Saturação
S	Nível de tensão
S'	Constante poroelástica
S_d	Tensor de tensões desviadoras
S_0	Tensão desviadora
t	Tempo
t'	Tempo adimensional
T'	Variável da função real usada na inversa de Stehfest
T_s	Força de superfície
u	Deslocamento
V	Volume de fluido
v_w	Velocidade média do fluido em relação à parte sólida
w_p	Trabalho plástico
x	Coordenada espacial

x'	Profundidade adimensional
α	Coeficiente de Biot
α'	Constante que determina o tipo de esquema de integração
α^*	Parâmetro da função de escoamento do modelo Lade - Kim
β	Coeficiente de velocidade
Δ	Incremento relacionado a variável que o acompanha
δ_{ij}	Delta de Kronecker
δu_w	Campo variacional relacionado a poro – pressão
δ_v	Campo de velocidade virtual
δ_ε	Taxa de deformação virtual
$\Delta\sigma_e$	Incremento de tensão tentativa elástica
ΔT	Subincremento de tempo usado no algoritmo de integração
ε	Deformação
ε_p	Deformação plástica
$\bar{\varepsilon}^{pl}$	Deformação plástica equivalente
ϕ	Carga piezométrica
η	Constante poroelástica
η_1	Parâmetro da função de ruptura do modelo Lade – Kim
φ	Ângulo de atrito
μ	Parâmetro da função potencial plástica do modelo Lade – Kim
ν	Coeficiente de Poisson
ν_u	Coeficiente de Poisson não – drenado
θ	Ângulo do sistema de coordenada cilíndrica

Θ	Ângulo polar desviador
θ'	Variação do volume de fluído
ρ_w	Massa específica do fluído
σ	Tensão
σ_n	Tensão normal a um plano
$\hat{\sigma}_n$	Tensão dada pelo método de Runge – Kutta Dormmand Price
σ_{rr}	Tensão radial
$\sigma_{r\theta}$	Tensão cisalhante em coordenada cilíndrica
$\sigma_{TWC,i}$	Tensão de ruptura inicial de uma amostra
$\sigma_{v,w}$	Maior tensão vertical efetiva suportada pela parede de um poço horizontal
$\sigma_{\theta\theta}$	Tensão circunferencial (ou tangencial)
τ	Tensão cisalhante
ξ	Parcela que representa a porção elástica durante um incremento de tensão tentativa
ψ	Ângulo de dilatância
ψ_1	Parâmetro da função potencial plástica no modelo Lade – Kim
ψ_2	Parâmetro da função potencial plástica no modelo Lade – Kim