

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Carolina del Valle Zambrano Cabrera

**Estudos numéricos e analíticos para
quantificar a produção de areia em um campo
da Bacia de Maracaibo, Venezuela**

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: Eurípedes do Amaral Vargas Junior

Rio de Janeiro, Abril de 2009



Carolina del Valle Zambrano Cabrera

**Estudos numéricos e analíticos para quantificar
a produção de areia em um campo da Bacia de
Maracaibo, Venezuela**

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 Junior
Orientador
PUC-Rio

Paulo Dore Fernandes
PETROBRAS

André Luís Müller
Puc-Rio

José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro Técnico - Puc-Rio

Rio de janeiro, 28 de Abril de 2009

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

Carolina del Valle Zambrano Cabrera

Engenheira de Petróleo graduada pela Universidad de Oriente, Nucleo Anzoategui em 2003.

Ficha Catalográfica

Zambrano Cabrera, Carolina Del Valle

Estudos numéricos e analíticos para quantificar a produção de areia em um campo da Bacia de Maracaibo, Venezuela / Carolina Del Valle Zambrano Cabrera; orientador: Eurípedes do Amaral Vargas Junior. – 2009.

104 f. : il. ; 30 cm

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

Inclui bibliografia.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Produção de areia. 3. Modelo analítico de Willson. 4. Modelagem numérica. 5. Ensaio de cilindro oco. I. Vargas Junior, Eurípedes do Amaral. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

A minha família, muito especialmente aos anjos que iluminam a
minha vida, Miguel Angel e Manuel Alejandro.

Agradecimentos

A Deus todo poderoso, pela força que me deu para culminar este longo caminho com sucesso.

A minha família, meus pais, Roberto e Luisa, meus irmãos, Roberto e Lisbeth, minha cunhada Fabíola pelo amor, apoio, compreensão.

Ao Sr. Pedro Acuña e Leonardo Graterol, por terem acreditado em mim e apoiado o desenvolvimento desta dissertação junto à minha empresa, o Intevp.

Ao pessoal de Estudos integrados e reservatório pela colaboração prestada no desenvolvimento deste trabalho. Aos meus companheiros Juan Ramos, Leydy Garcia e Juan Almeida pela disposição e apoio

Ao Professor Eurípedes Vargas, orientador deste trabalho, pessoa de grande capacidade, fonte de estímulo e sabedoria.

O meu mais sincero agradecimento ao grupo de mecânica das rochas do Cenpes-Petrobras: Francisco Henriques, Karen Lobato, Erick Slis, Rodrigo Barra, Julio Beltrami, Rafael, Marcos Dantas, Marcos, Antônio Cláudio, que além de dispor o laboratório, não hesitou em compartilhar o seu conhecimento. Os conselhos que recebi foram muito importantes não só neste trabalho, mas também no meu desenvolvimento como profissional.

A quatro pessoas chave em todo o processo desta dissertação: Geralf Pineda, Jose Roberto Silvestre, Carlos Aguilar e Raquel Velloso. Não tenho palavras para expressar meu agradecimento.

Aos meus grandes amigos no Brasil: Pamela, Ranena, Camilo e Patricia, pelo apoio, pelas palavras nos momentos difíceis, carinho e amizade.

Meus amigos na Venezuela, Vanessa, JeanCarlo, Katiuska, Rosalinda, Fabiola e Cesar.

As meninas do apartamento, Lorena, Carlinha e a Gabi pelos bons e descontraídos momentos além das importantes correções com o português.

A todos que, de alguma forma, me ajudaram a chegar aqui.

Resumo

Zambrano Cabrera, Carolina Del Valle; Vargas Junior, Eurípedes do Amaral (orientador). **Estudos numéricos e analíticos para quantificar a produção de areia em um campo da Bacia de Maracaibo, Venezuela.** PUC - Rio, 2009. 104p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A produção de areia em poços de petróleo é um problema bem conhecido devido às conqûências catastróficas, que muitas vezes chegam a afetar a vida produtiva de um reservatório inteiro. Estudos sobre o assunto vêm sendo desenvolvidos, e uma importante linha de pesquisa tem se formado. No entanto, estes estudos focam principalmente na predição ou começo da produção de areia, dando uma importância menor à sua quantificação. Há mais de vinte anos, este problema tem sido relatado em um Campo da Bacia de Maracaibo na Venezuela, levando ao fechamento de um grande numero de poços. O problema é ainda maior devido às condições do reservatorio: profundidade (maior a 5000 (m)), alta pressão e temperatura assim como a resistência mecânica da rocha (maior a 50 (Mpa)) fazem que estudos mais avançados sejam precisados para além de determinar que fatores influenciam este fenômeno, observar se os modelos de quantificação utilizados neste trabalho representam o que ocorre no campo. Para isto, utilizo-se o software comercial de elementos finitos Abaqus junto com a sub-rotina de erosão assim como o modelo analítico de Willson, baseada na resistência equivalente da formação obtida a partir dos ensaios de cilindro oco ou *TWC (thick Walled Cylinder)* desenvolvidos também neste trabalho. Em ambos métodos, foram imposta condições reais do campo: estado de tensão, pressão de fundo do poço, poro-pressão, assim como o comportamento tensão-deformação da rocha, obtidos a partir de ensaios de compressão uniaxial. Para o caso da modelagem numerica, forem analisados dois casos, poço aberto (modelo de duas dimensoes) e tunel canhoneado (modelos de tres dimensoes). No caso do modelo de Willson foi implementado o túnel canhoneado.

Palavras-chave

Produção de areia, simulação numérica, modelo analítico Willson, ensaio do cilindro oco.

Abstract

Zambrano Cabrera, Carolina del Valle. Vargas Junior, Eurípedes do Amaral (Advisor). **Numerical and Analytical studies to quantify the sand production in a field of the Maracaibo Basin, Venezuela.** PUC - Rio, 2009. 104p. Msc. Dissertation - Civil Engineering Department, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Sand production at oil wells is a well-known problem, due to the disastrous consequences that in some cases affect the productivity of the entire reservoir. Studies about the subject have been development and a very important research line has been created. However, those progresses are more focus on sand production onset, giving less importance to the quantification issue. Whit more than twenty years, there is a field located on Maracaibo Basin, Venezuela that has been affected with this problem occasionating the closure of a big amount of wells. The problem is even bigger due to the reservoir conditions: depth (more than 5000 (m)), high pressure and temperature conditions and also rock mechanics strength (more than 50 (Mpa)) make that more advanced studies will be need for seeking the factors that affect in this phenomenon and observe if the quantifications models used in this work represent the field observations. For this, was used the commercial software of finite elements Abaqus whit the erosion sub-routine as well as the analytical Willson model based on the equivalent strength formation obtain from thick walled cylinder test development in this work also. In both methods were used real field conditions: state of stress, bottom hole pressure, pore pressure and the stress-strain rock behavior obtain form uniaxial compression test. For the numerical model were analyzed two cases, open hole (two dimension model) and perforation tunnel (three dimension model). For the analytical Willson model was just implemented the perforation tunnel case.

Key-words

Sand production, numerical simulation, Willson analytical model, Thick hollow cylinder

Sumário

Lista de símbolos	14
1 . Introdução	17
2 . Fundamentos básicos sobre produção de areia	19
2.1. Introdução	19
2.2. Mecanismo de produção de sólidos	20
2.2.1. Ruptura à compressão ou cisalhamento	20
2.2.2. Ruptura por tração (<i>Spalling</i>)	21
2.3. Fatores que afetam a produção de areia	22
2.3.1. Fatores relacionados à formação	23
2.3.2. Fatores relacionados à completação	24
2.3.3. Fatores relacionados à produção	26
2.4. Modelos de predição de areia	28
2.5. Experimentos para a simulação da produção de areia	30
2.5.1. Ensaio em cilindros de paredes espessas, ou TWC (Thick Walled Cylinder)	30
3 . Descrição do Campo em estudo	33
3.1. Antecedentes	33
3.2. Descrição do reservatorio	34
3.3. Definição do estado de tensões e pressão de poro	36
3.3.1. Pressão de poros	38
3.4. Definição das propriedades mecânicas	38
3.5. Representação esquemática dos poços da área	41
4 . Programa Experimental	42
4.1. Preparação dos corpos de prova	42
4.2. Equipamento utilizado	45
4.3. Metodologia Utilizada	46
4.3.1. Ensaio de Compressão Uniaxial	46
4.3.2. Ensaio de paredes espessas (<i>Thick walled cylinder, TWC</i>)	47

5 . Resultado dos ensaios experimentais	51
5.1. Resultados dos ensaios uniaxiais	51
5.2. Resultados dos ensaios com cilindros de paredes espessas (TWC)	56
6 . Modelagem numérica com o programa Abaqus	63
6.1. Modelo de erosão 2D e 3D	63
6.1.1. Modelagem numérica em 2D	63
6.1.2. Modelagem numérica 3D	66
6.2. Modelagem numérica do ensaio de cilindro de paredes espessas	69
6.3. Sub-rotina de erosão do programa Abaqus	70
6.3.1. Definições do modelo matemático	71
6.3.2. Lei Constitutiva da geração de massa	73
6.4. Uso das malhas adaptativas no modelo de erosão	74
7 . Resultados do modelo numérico	76
7.1. Resultados da modelagem numérica de problemas em 2D	76
7.2. Modelo 3D	86
8 . Modelo Analítico de Willson.	88
8.1. Definição do modelo	88
9 . Conclusões e Sugestões para trabalhos futuros	92
9.1. Conclusões	92
9.2. Sugestões	93
10 Referencias Bibliográficas	94
Apendice A	99
Apendice B	103

Lista de figuras

Figura 1.- Breakout observado em corpo de prova com ID=39mm – Berea	22
Figura 2.- Fraturamento à tração observado em corpo de prova com ID=39mm –Castlegate	22
Figura 3.- Efeito das mudanças nas tensões in situ em a estabilidade de cavidades esféricas (Morita 1989)	23
Figura 4.- Plastificação da formação por contração do cimento (Dusseault & Santarelli, 1989)	25
Figura 5.- Plastificação da formação após o canhoneio (Dusseault & Santarelli, 1989)	25
Figura 6.- Rupturas por tração associadas à força de percolação. poço aberto (lado esquerdo) túnel canhoneado (lado direito)	26
Figura 7.- Formas de rupturas típicas para arenitos. (a) Clase A (e.g Castlegate) (b) Clase B (e.g. Field G), and (c) Clase C (e.g. arenito sintético)	27
Figura 8.- Configuração do ensaio cilindro de paredes espessas (TWC)	31
Figura 9.- Relação da pressão externa em função da espessura (relação OD/ID) e diâmetro interno no ensaio TWC (Willson, 2002)	32
Figura 10.- Localização da Bacia de Maracaibo, Venezuela	34
Figura 12.- Produção de areia acumulada no campo	36
Figura 13.- <i>Core Disking</i> , prova dos altos gradientes horizontais na zona	37
Figura 14.- Variação da direção da tensão horizontal maior no reservatorio	38
Figura 16.- Comportamento do registro litológico do poço	40
Figura 17.- Representação esquemática padrão dos poços	41
Figura 18.- Tomografia computadorizada das amostras em estudo	43
Figura 19.- Tomografia computadorizada (em escala de cores) das amostras em estudo	43
Figura 20.- Corpos de prova para os ensaio de Compressão uniaxial	44
Figura 21.- Corpo de prova para os ensaio de cilindro oco	45
Figura 22.- Execução do ensaio de compressão uniaxial	46
Figura 23.- Saturação das amostras. Ensaio de cilindro oco, ou <i>TWC</i>	47
Figura 24.- Corpo de prova saturado	48
Figura 25.- Colocação dos <i>caps</i> no corpo de prova	48
Figura 26.- Montagem dos extensômetros elétricos	49

Figura 27.- Execução do ensaio de cilindro oco	49
Figura 28.- Comportamento tensão-deformação dos corpos de prova 05 e 12 do arenito A	52
Figura 29.- Classificação do comportamento tensão-deformação de rochas sob compressão uniaxial durante o amolecimento. Wawersick & Fairhurst (1970)	53
Figura 30.- Corpo de prova # 5. Logo após do ensaio UCS	53
Figura 31.- Comportamento tensão-deformação com ciclos de descarregamento e re-carregamento	54
Figura 32.- Curva virgem (traços) e curva re-carregada (continua) para a determinação dos parâmetros elásticos (Goodman, 1989)	55
Figura 33.- Comportamento tensão-deformação radial para o cálculo da relação de poisson	56
Figura 34.- Comportamento tensão-deformação do CP01 obtido com ensaio em cilindro de parede espessa.	57
Figura 36.- Comparação das tensões máximas e mínimas do modelo analítico e numérico ao longo do raio	59
Figura 37.- Comportamento tensão-deformação do CP01 obtido com ensaio em cilindro de paredes espessas com relação de diâmetros 2:1	59
Figura 38.- Falha da rocha no ensaio do cilindro ôco	60
Figura 39 Comparação do tipo de falha do trabalho de Papamichos com o ensaio <i>TWC</i>	61
Figura 40.- Comportamento tensão-deformação do ensaio <i>TWC</i> .	61
Figura 41.- Comparação dos resultados do <i>TWC</i> em função da resistência à Compressão Uniaxial.	62
Figura 42.- Representação do carregamento aplicado	64
Figura 43.- Malha para a modelagem em duas dimensões	64
Figura 44.- Detalhe da malha (na zona do poço)	65
Figura 45.- Condições iniciais, de contorno e carregamento no modelo 2D	65
Figura 46 Malha do modelo 3D	66
Figura 47 Condições iniciais, de contorno e carregamento aplicado	67
Figura 48 Detalhe da malha 3D. Túnel canhoneado	67
Figura 49 Aplicação da pressão de fluido nas faces do túnel canhoneado	68
Figura 51 Malhas utilizadas para a modelagem do ensaio de cilindro oco. Relação de diâmetros 3:1 (a) e 2:1 (b)	69
Figura 52.- Condições iniciais e de carga na modelagem	70

Figura 53.- Representação dos componentes que considera o modelo matemático	71
Figura 59.- Volume de areia produzido com as novas modificações (Tabela 6)	80
Figura 60.- Volume de areia para o tempo de 60 horas	81
Figura 61.- Seqüência do processo de erosão expressado em deformações plásticas equivalentes (PEEQ)	83
Figura 62.- Volume produzido para um tempo de 200 horas	83
Figura 63.- Volume produzido em poço com drawdown de 14 (Mpa)	84
Figura 64.- Comparação do volume produzido em função do drawdown	85
Figura 65.- Comportamento da deformação plástica equivalente no túnel canhoneado	86
Figura 66.- Relação do fator de resistência em função da relação de diâmetros das amostras de cilindro de parede espessa	89
Figura 67.- Previsão da produção de areia a partir do modelo analítico de Willson	90

Lista de tabelas

Tabela 1.- Parâmetros que influenciam a produção de areia	23
Tabela 2.- Definição dos gradientes de tensão do campo	37
Tabela 3.- Propriedades mecânicas do arenito A. ensaios feitos no Intevap	39
Tabela 4.- Corpos de prova	45
Tabela 5.- Parâmetros utilizados nas simulações	78
Tabela 6.- Parâmetros para a simulação	80
Tabela 7.- Análise de sensibilidade	82

Lista de símbolos

ΔP	Diferencial de pressão entre o reservatório e o poço
$\left(\frac{dp}{dr}\right)_c$	Gradiente de pressão de poro na cavidade
M_s	Quantidade de areia por área na cavidade
σ_c	Tensão externa
t	Tempo
a_s	Constante de calibração
$\left(\frac{dp}{dr}\right)_s$	Gradiente critico de pressão de poro
σ_n	Excesso de tensão normalizado
OD	Diâmetro externo
ID	Diâmetro interno
P_b	Pressão de ruptura
S_h	Tensão horizontal mínimo
S_H	Tensão horizontal máxima
S_v	Tensão vertical
P_o	Pressão de poro
T_o	Resistência à tração
$\sigma_v(D)$	Tensão de sobrecarga
$\sigma_v(Dn)$	Tensão de sobrecarga normal
k	Gradiente normal de pressão hidrostática
τ_c	Onda compressional do perfil sônico
ϕ	Ângulo de atrito (Modelo Mohr Coulomb)
C_o	Coesão (Modelo Mohr Coulomb)
d	Coesão (Modelo Drucker Prager)
dV	Volume do elemento
dV_T	Volume total
dV_v	Volume de vazios

dV_{ff}	Volume da fase fluida
dV_{fs}	Volume das partículas fluidizadas
dV_s	Volume de sólidos
\dot{dM}	Massa da mistura
dM_{ff}	Massa da fase fluida
dM_{fs}	Massa das partículas sólidas fluidizadas
dM_s	Massa de sólidos
V_i^{fs}	Velocidade das partículas sólidas fluidizadas
V_i^{ff}	Velocidade da fase fluida
V_i^s	Velocidade da fase sólida
ρ_{fs}	Densidade das partículas sólidas fluidizadas
ρ_{ff}	Densidade da fase fluida
ρ_s	Densidade dos sólidos
$\bar{\rho}$	Densidade da mistura
\bar{q}_i	Velocidade de descarga da mistura
dS_i	Área transversal
dt	Tempo
\dot{m}_i	Taxa de transferência de massa da mistura
\dot{m}_i^{ff}	Taxa de transferência de massa do fluido
\dot{m}_i^{fs}	Taxa de transferência de massa das partículas fluidizadas
\dot{m}_{er}	Taxa de massa erodida
λ'	Coefficiente de produção de areia
λ	Coefficiente de produção de areia
g^p	deformação plástica
g_{peak}^p	deformação plástica de pico
C	Concentração de transporte dos sólidos fluidizados
λ_1	Constante de calibração
λ_2	Constante de calibração

X	Posição original do nó
U_{i+1}	Deslocamento nodal
X_i^N	posições nodais das vizinhanças
N^N	funções de peso
$PEEQ$	Deformações plásticas equivalentes
U	Resistência efetiva à formação
$CBHFP$	Critical Bottom hole flowing pressure
CDP	Critical drawdown pressure
TWC	Thick Hollow Cylinder
FC	Factor de correção