



Anderson Rapello dos Santos

**Análise do Colapso de Telas Utilizadas em Sistemas de
Contenção de Areia em Poços Horizontais**

Dissertação de Mestrado

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

Orientadores:
Arthur Martins Barbosa Braga
Eurípides do Amaral Vargas Junior

Rio de Janeiro, 03 de abril de 2007



Anderson Rapello dos Santos

Análise do Colapso de Telas Utilizadas em Sistemas de Contenção de Areia em Poços Horizontais

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

Prof. Arthur Martins Barbosa Braga

Orientador

PUC-Rio - Departamento de Engenharia Mecânica

Luis Paulo Franco de Barros

Petrobras/UN-Rio/ATP-RO/IP

Luis Carlos Baralho Bianco

Petrobras/UN-Rio/ATP-RO/IP

Prof. Carlos Alberto de Almeida

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 03 de abril de 2007

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

Anderson Rapello dos Santos

Engenheiro químico formado pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Ingressou na Shell Brasil Ltda em 1999, trabalhando como consultor técnico na especificação e implantação de serviços e sistemas de armazenamento de lubrificantes e combustíveis no período de 1999 a 2001.

Ingressou na Petrobras em 2001. Concluiu o curso de especialização em engenharia de petróleo pela Universidade Petrobras em 2002. Desde então atua como engenheiro de petróleo no planejamento, projeto e construção de poços de petróleo off shore.

Ficha Catalográfica

Santos, Anderson Rapello dos

Análise do colapso de telas utilizadas em sistemas de contenção de areia em poços horizontais / Anderson Rapello dos Santos ; orientadores: Arthur Martins Barbosa Braga, Eurípedes do Amaral Vargas Junior. – 2007.

123 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses.
2. Produção de areia. 3. Poços horizontais. 4. Sistema de exclusão mecânica.
5. Resistência ao colapso. 6. Modelos constitutivos. 7. Mecanismos de ruptura. 8. Mohr Coulomb. I. Braga, Arthur Martins Barbosa. II. Vargas Junior, Eurípedes do Amaral. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

A minha filha querida, Ana Beatriz, e a amada esposa Christiane
pelo amor e dedicação.

“Porque a sabedoria deste mundo é loucura diante de Deus”

Coríntios, 3, 19

Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar à Deus sem O qual nada é possível

Agradeço à minha esposa Christiane pelo apoio inestimável, entendimento e compreensão durante os muitos momentos de ausência necessários à elaboração deste trabalho.

Aos meus pais pela minha formação, educação e dedicação durante toda a vida.

Agradeço ao professor Arthur Martins Barbosa Braga pela oportunidade de desenvolvimento deste trabalho, por sua orientação e pela confiança depositada nos muitos períodos difíceis que passei durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao professor Eurípedes Vargas pela sua dedicação, paciência, ensinamentos e orientação ao longo da elaboração deste trabalho.

Agradeço aos (muitos) colegas da Petrobrás e PUC (que para não cometer nenhuma injustiça não foram listado aqui) pelas conversas, trocas de idéias e discussões que muito contribuíram para que esta tese se tornasse uma realidade.

Agradeço a colaboração de todos os funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Resumo

dos Santos, Rapello Anderson. **Análise do Colapso de Telas Utilizadas em Sistemas de Contenção de Areia em Poços Horizontais**. Rio de Janeiro, 2007. 123 p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A produção de petróleo em alta vazão a partir de reservatórios formados por arenitos friáveis requer a instalação de sistemas de contenção de sólidos para preservar equipamentos de superfície e subsuperfície.

Os projetos de exploração para campos constituídos por estes reservatórios têm na completação uma etapa fundamental na construção do poço. Dentre as diversas operações de completação, a instalação de sistemas de contenção de sólidos é uma das mais complexas e envolve uma ampla gama de recursos humanos e financeiros. A alteração no estado de tensões atuante sobre a formação é uma das principais fontes de carregamento dos sistemas de contenção mecânica de sólidos instalados em poços horizontais.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo para avaliação do desempenho de sistemas de contenção de sólidos do tipo *gravel pack* quando submetidos aos esforços relacionados ao comportamento geomecânico das formações produtoras e a variação de pressões durante a vida produtiva de um poço de petróleo, permitindo a otimização de projetos destes sistemas sob a ótica da resistência ao colapso das telas.

O carregamento imposto sobre estes sistemas é avaliado através da implementação do modelo de Mohr Coulomb solucionado numericamente através do método de elementos finitos (MEF).

O programa comercial ABAQUS™ é utilizado em função da sua flexibilidade para solução de modelos não-lineares.

Foram analisados sistemas de contenção de areia com os conjuntos de telas tipicamente utilizados na indústria de petróleo. Em nenhum cenário analisado foram verificados indícios de colapso dos tubos indicando a possibilidade de redução da sua resistência mecânica.

Palavras-chave

Produção de areia; poços horizontais; sistema de exclusão mecânica; resistência ao colapso; modelos constitutivos; mecanismos de ruptura; Mohr Coulomb;

Abstract

dos Santos, Rapello Anderson. **Collapse Analysis of Screens Used in Open Hole Completion.** Rio de Janeiro, 2007. 123 p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Global increase in energy demand and the lack of opportunities on shore or in shallow waters are driving production of hydrocarbons towards deep and ultra deep-water basins, where reservoirs are usually formed by weak and unconsolidated sandstones that require sand control methods to prevent damage in surface and subsurface equipments.

Guidelines to select sand control systems are primarily based on sand exclusion, seeking to optimize balance between oil rate and fines production. Another aspect, often overlooked, is collapse strength of the system formed by the sand control equipment and the formation itself, subjected to mechanical loadings that change during life of the well.

This contribution presents a method to evaluate collapse strength of sand control systems taking into account mechanical interaction between the formation and sand control screens. Elastoplastic models are used to represent granular materials. Three sand control systems were studied: gravel pack with premium screens, stand alone premium screens and pre-packed screens. A model to describe contact between granular materials (gravel and formation) and soil-pipe interaction is proposed.

Results demonstrate that perforated base pipes used in premium screens may be oversized for applications under regular operating conditions.

Keywords

Sand control; horizontal wells; gravel packing; Premium Screens; Mohr Coulomb;

Lista de figuras

Figura 1 – Áreas petrolíferas off shore apresentada por Eissler, 1983.	16
Figura 2 - Produção de óleo e LGN (Relatório Anual da Petrobrás, 2005).	17
Figura 3– Mapa da Bacia de Campos (RJ) e Espírito Santo.	19
Figura 4– Conjunto descido para jateamento do revestimento condutor.	24
Figura 5 – Esquema de poço slender perfurado e pronto para completação.	25
Figura 6 – Esquema da interligação da plataforma ao fundo do mar durante a perfuração.	26
Figura 7 – Esquema de poço após completação e ANM convencional no detalhe.	28
Figura 8 – Avaliação de Saucier para definição da relação de diâmetros gravel/areia.	30
Figura 9 – Diagrama para seleção do sistema de contenção de areia – Bianco (2003)	30
Figura 10 – Exemplo de Telas Expansíveis (Manual de Telas Weatherford).	31
Figura 11 – Curva de distribuição granulométrica para arenitos.	33
Figura 12 – Esquema de camadas em telas Premium (Manual de Telas Halliburton).	34
Figura 13– Sistemas de coordenadas utilizado para a descrição do estado de tensões.	37
Figura 14– Sistema de coordenadas na parede do poço.	38
Figura 15 – Esquema de tensões no poço vertical estudado neste capítulo.	42
Figura 16 – Variação de tensões principais com r na seção AA.	43
Figura 17 – Malha de elementos utilizada e distribuição de esforços atuante na formação.	44
Figura 18 – Variação da tensão radial $c/$ raio do poço (a) e mapa da tensão σ_{11} da formação (b) em psi.	45
Figura 19– Variação da tensão tangencial c raio do poço (a) e mapa da tensão da formação (b) em psi.	45
Figura 20– Comparação de resultados numéricos x empíricos.	46
Figura 21 – Representação da seção transversal do poço em formação infinita.	48
Figura 22 – Solução do estado de tensões em um poço vertical onde $\theta = n\pi$.	49
Figura 23– Critério de ruptura de Mohr Coulomb no espaço τ - σ .	51
Figura 24 – Malha de elementos finitos utilizada na simulação elasto plástica 2D.	54
Figura 25 – Variação das tensões principais com a distância do poço em função da coesão.	55
Figura 26 – Variação das tensões principais com a distância do poço em função do ângulo de atrito.	55
Figura 27– Variação das tensões principais com a distância da parede interna.	56
Figura 28 – Campo de tensões em σ_{22} no modelo LE (a) e Mohr Coulomb (b) em psi.	57
Figura 29– Campo de tensões em σ_{11} no modelo LE (a) e Mohr Coulomb (b) em psi.	58
Figura 30 – Campo de tensões em σ_{11} no modelo LE (a) e Mohr Coulomb (b) em psi.	59
Figura 31 – Campo de tensões em σ_{22} no modelo LE (a) e Mohr Coulomb (b) em psi.	60
Figura 32 – Resistência ao Colapso em função da relação OD/t (API Bulletin 5C3).	63
Figura 33 – Variação das tensões tangenciais e radiais c o raio do tubo (analítico x numérico) em psi.	66
Figura 39 – Comportamento pressão x deslocamento para tubo 6 5/8 (Abassian 1998).	69
Figura 35 – Resultados para avaliação comprimento do modelo simulado, L, na deformação do tubo.	71
Figura 36 – Variação do comportamento do tubo 5 1/2 pol 84 furos/ft comparando a Abassian (1995).	72
Figura 37 – Comparação com resultado de Abassian para tubo 5 1/2 pol P110.	73
Figura 38 – Distribuição de tensão de Mises (em psi) no tubo com 216 furos/ft e 7000 psi.	74
Figura 39 – Distribuição de tensão de Mises (em psi) no tubo com 72 furos/ft e 7000 psi.	74

Figura 40 - Variação da pressão de colapso com a área aberta ao fluxo.	75
Figura 41 – Esquema de gravel pack em poço aberto (a) e poço revestido (b).	77
Figura 42 – Esquema 2 D do conjunto formação x gravel x tubo.	78
Figura 43 – Esquema do tubo base utilizado no acoplamento tubo x gravel x formação.	79
Figura 44 – Condições de contorno prescritas no modelo utilizado.	80
Figura 45 – Modelo utilizado na descrição da tensão efetiva em solos saturados.	82
Figura 46 – Propriedades mecânicas de formação off shore.	85
Figura 47 – Variação da tensão σ_{11} e σ_{22} para diversos valores de coesão da formação.	85
Figura 48 – Variação das tensões radiais e tangenciais nas interfaces G/F e G/T.	87
Figura 49 – Tensão de Mises no tubo em função módulos de Young do gravel.	88
Figura 50 – Modelo para Contato gravel x formação elasto-plástico com atrito.	90
Figura 56 – Definição do ponto fixo e do plano tangente para o nó 103.	91
Figura 52 – Variação da tensão principal σ_{22} (em psi) no pacote de gravel p/ superfícies coladas	93
Figura 53 – Variação da tensão radial com o raio do poço.	93
Figura 54 – Tensão principal σ_{22} (em psi) na formação acoplada ao tubo (a) e não acoplada (b)	94
Figura 55 – Variação da tensão σ_{22} na seção AA com $\sigma_v = 6372$ psi e $\sigma_h = 5167$ psi.	95
Figura 56 – Variação da tensão σ_{11} na seção AA com $\sigma_v = 6372$ psi e $\sigma_h = 5167$ psi.	96
Figura 57 – Tensão de Mises (em psi) no corpo do tubo considerando atrito entre as superfícies.	96
Figura 58 – Busca da Convergência pelo Método de Newton-Raphson	100
Figura 59 – Elementos isoparamétricos utilizados nas simulações com o ABAQUS™.	101
Figura 60 – Malha de elementos na simulação 3D para o conjunto tubo x gravel x formação.	102
Figura 61 – Esquema dos modelos simulados	103
Figura 62 – Esquema de poço representado no cenário 1	105
Figura 63 – Tensão principal σ_{22} para a formação sem o tubo de acordo com as condições da tabela 6.	106
Figura 64 – Tensões de MC (em psi) para a formação s/o tubo de acordo com as condições da Tab 6.	107
Figura 65 – Campo de tensões de MC para a formação s/o tubo de acordo com as condições da Tab 6.	107
Figura 66 – Superfície de deformação plástica em polegadas na parede do poço após a perfuração	108
Figura 67 – Campo de tensões tangenciais (em psi) para a formação com o tubo acoplado.	109
Figura 68 – Variação da tensão tangencial na formação em função do raio do poço.	110
Figura 69 – Variação da Tensão de Mises com a deformação.	110
Figura 70 – Tensão de Mises (em psi) no tubo base com 72 furos/pé e furos de $\frac{3}{8}$ polegadas.	111
Figura 76 – Tensão de Mises (em psi) no tubo base com 72 furos/pé e furos de $\frac{1}{2}$ polegadas.	111
Figura 72 – Tensão de Mises (em psi) no tubo base com 84 furos/pé e furos de $\frac{1}{2}$ polegadas.	112
Figura 73 – Variação da Tensão de Mises com a área aberta ao fluxo.	113
Figura 74 – Condições de contorno consideradas na simulação do draw down.	114
Figura 75 – Evolução da Tensão de Mises em cada etapa da simulação.	115
Figura 76 – Evolução da Tensão de Mises em cada etapa da simulação.	116
Figura 82 – Tensão de Mises no tubo base com 72 furos/pé e furos de $\frac{3}{8}$ polegadas.	117
Figura 83 – Variação da Tensão de Mises com a área aberta ao fluxo.	117
Figura 84 – Acoplamento tubo base + carcaça (cortesia Smarttech)	121

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Comparação de Pressão de Colapso para Tubos P110	71
Tabela 2 – Características Geométricas do Modelo para o Tubo Base	80
Tabela 3 – Características do Poço e da Formação	86
Tabela 4 – Propriedades Mecânicas dos Materiais	86
Tabela 5 – Valores de Tensão Considerados na Modelagem da Interface	92
Tabela 6 – Especificação do Modelo em Função de Cada Cenário	104

Lista de Variáveis

a: espaçamento entre furos

c: coesão

d_p : diâmetro dos furos

d_i : diâmetro médio do tubo ovalizado para fórmula de Abassian

E: Módulo de elasticidade

ID: Diâmetro interno

L: Comprimento do tubo ou seção do tubo

OD: diâmetro externo

P_e : Pressão externa atuante na tubulação

P_i : Pressão interna atuante na tubulação

PV: Profundidade vertical

OVB: gradiente de sobrecarga

Rc: Resistência à compressão uniaxial da rocha

R_e : Raio externo

R_{eM} : Raio externo maior do tubo ovalizado

R_{em} : Raio externo menor do tubo ovalizado

R_i : Raio interno

R_{iM} : raio interno maior do tubo ovalizado

R_{im} : raio interno menor do tubo ovalizado

Smises: Tensão equivalente de Mises

t = espessura do tubo

u_i : deslocamento na direção "i"

Φ : coeficiente de atrito

ε_i : deformação na direção "i"

ε_i : deformação na direção "i"

ε_r : deformação radial

ε_θ : deformação tangencial = ε_r

ν : coeficiente de Poisson

σ_c : Tensão circunferencial

σ_H : Tensão horizontal máxima

σ_h : Tensão horizontal mínima

σ_i : Tensão na direção principal "i" onde $i = 1, 2$ e 3

σ_{ii} : Tensão normal ao plano “i”

σ_{ij} : Tensão cisalhante ao plano “j” = τ_{ij}

σ_r : Tensão Radial

σ_t : Tensão tangencial

σ_v : Tensão de sobrecarga (tensão vertical)

σ_y : Tensão limite de escoamento

Sumário

1	Introdução	16
1.1	<i>Objetivo</i>	19
1.2	<i>Relevância do Trabalho</i>	20
1.3	<i>Organização do Trabalho</i>	21
2	A Construção de Poços Off Shore	23
2.1	<i>A Perfuração de Poços</i>	23
2.1.1	Introdução	23
2.1.2	Início de Poço	24
2.1.3	Perfuração das Fases Finais do Poço	25
2.2	<i>A Completação de Poços</i>	27
2.2.1	Introdução	27
2.2.2	A Contenção de Areia	29
2.2.3	Seleção do Método de Contenção de Areia	29
2.2.4	Telas Expansíveis	31
2.2.5	A Completação Stand Alone	31
2.2.6	O Gravel Packing Horizontal em Poço Aberto	32
2.2.7	Os constituintes das Telas Premium	33
3	Modelos Geomecânicos para Análise da Estabilidade de Poços	35
3.1	Modelos Geomecânicos	36
3.2	Sistemas de Coordenadas Utilizados	37
3.3	Solução Analítica para o Poço Vertical	40
3.4	Solução Numérica para o Poço Vertical	43
3.5	Solução para o Poço Inclinado com $\sigma_v \neq \sigma_H$	46
3.6	Simulações Considerando Modelo de Mohr Coulomb	49
3.7	Conclusões	61
4	Modelos para Análise do Colapso de Tubos Utilizados na Completação	62
4.1	<i>Análise do Colapso em Tubulações de Poços</i>	63
4.2	Teoria para Cálculo de Tensões em Cilindros	65
4.3	Modelo de Quatro Rótulas	67

4.4	Critério de Resistência de Von Mises	69
4.5	Resultados Numéricos para Avaliação do colapso de tubos	70
4.6	Conclusões	75
5	Acoplamento do Conjunto Tela – Gravel – Formação	77
5.1	Modelagem e Propriedades do Tubo	79
5.1.1	Modelagem e Propriedade do Gravel e Formação	81
5.1.2	Propriedades Geomecânicas da Formação	82
5.1.3	Propriedades Geomecânicas do Gravel	87
5.2	Relações de Contato entre as Superfícies	88
5.2.1	Modelos Mecânicos de Contato Utilizados	89
5.3	Modelagem Numérica Proposta	97
5.3.1	Solução de problemas não lineares pelo MEF	97
5.3.2	Elementos Finitos Utilizados nos Modelos Simulados	100
6	Análise e Discussão de Resultados	103
6.1	Cenário 1: Sem Pressão Interna no Tubo	105
6.2	Cenário 2: Pressão Interna e Draw Down	113
7	Conclusões e Oportunidades de Estudos Futuros	118
7.1	Conclusões	118
7.2	Oportunidades de Trabalhos Futuros	120
8	Referências Bibliográficas	122