



Rafael Richie Lopez Chavez

**Ensaaios em Célula Cúbica de Grandes Dimensões para
Estudo de Medidas de Contenção de Sólidos em Poços
de Petróleo**

Dissertação de Mestrado

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

Orientadores: Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Jr.
Co-orientador: Dr. Mauro Bloch

Rio de Janeiro, 04 de abril de 2011



Rafael Richie Lopez Chavez

**Ensaio em Célula Cúbica de Grandes Dimensões para Estudo de
Medidas de Contenção de Sólidos em Poços de Petróleo**

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.

Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Jr.

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Dr. Mauro Bloch

Co-orientador

CENPES/Petrobrás

Prof^a. Michéle Dal Toé Casagrande

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Dra. Raquel Velhoso

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 04 de abril 2011

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

Rafael Richie Lopez Chavez

Graduou-se em Engenharia Geológica pela Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa – Peru, em 2005. Ingressou no mestrado na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2008, desenvolvendo dissertação na linha de pesquisa de Mecânica das Rochas.

Ficha Catalográfica

Chavez, Rafael Richie Lopez

Ensaio em Célula Cúbica de Grandes Dimensões para Estudo de Medidas de Contenção de Sólidos em Poços de Petróleo / Rafael Richie Lopez Chavez; orientador: Eurípedes Vargas do Amaral Jr. – 2011,

111 f. :il;(color); 29,7 cm.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro, 2011
natureza da ficha catalográfica

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Produção de Sólidos 3. *Gravel Pack* 4. Ensaio em Célula Cúbica 5. Amostras de grandes dimensões 6. Simulação Física 7. Poços de Petróleo I. Eurípedes Vargas do Amaral Jr. II. Pontifícia Universidade Católica do rio de Janeiro. III. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Aos meus pais America e Daniel,
A minha família.

Agradecimentos

A Deus, por sempre iluminar meu caminho.

Ao professor Eurípedes Vargas pela oportunidade de desenvolvimento deste trabalho, pela orientação e confiança depositada desde o começo da dissertação.

Ao meu co-orientador, Mauro Bloch, pela orientação, paciência e sugestões ao longo deste trabalho.

Ao pessoal do Laboratório de Simulação Física do CENPES/PETROBRAS, Windson pela constante ajuda, a Luis pelas dicas, a Lincoln pelas conversas técnicas, Silvio, William, Besa, ao pessoal do laboratório de Mecânica das Rochas, Marcos Dantas, Marcos Soares, Rodrigo, Aline.

Ao pessoal do Laboratório de Estruturas da PUC-Rio, Euclides pelo suporte com as instrumentações, Evandro, Jose, sempre dispostos para ajudar.

Ao pessoal do Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ, Professor Romildo por permitir o uso das instalações do laboratório, Dra Reila, senhor Julio pelos conselhos e amizade, Alex, Adailton, Flavio, Clodoaldo, e ao Eduardo, que contribuíram neste trabalho.

A empresa BJ Services, pelo fornecimento do Gravel Pack.

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio pelos ensinamentos e constante disposição para esclarecer as muitas duvidas.

Aos meus colegas de pós-graduação, pelos bons momentos, discussões e luzes.

A minha colega Flavia pelas dicas, paciência e pela disposição do seu tempo para minhas consultas.

A Rita pela eficiência profissional, apoio e paciência com o pessoal da pós-graduação.

A CNPq pelo apoio financeiro.

A meus pais e irmãos por sempre confiar em mim.

Resumo

Chavez, Rafael Richie Lopez; Vargas Jr., Eurípedes do Amaral (Orientador). **Ensaio em Célula Cúbica de Grandes Dimensões para Estudo de Medidas de Contenção de Sólidos em Poços de Petróleo**. Rio de Janeiro, 2011. 111p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Um dos maiores problemas na indústria do petróleo durante a extração de hidrocarbonetos é a produção de sólidos, grãos de areia que usualmente são gerados a partir de formações pouco consolidadas, como nos arenitos, podendo causar erosão nas linhas de produção, equipamentos de elevação e de superfície, colapso de revestimentos e obstrução do poço. Esses eventos e outros relacionados representam para essa atividade, elevados custos ambientais e econômicos. Nesta dissertação foi simulado experimentalmente o funcionamento de sistemas de contenção de sólidos mais utilizados para poços horizontais sem revestimento, estes ensaios foram executados em blocos de arenitos sintéticos de grandes dimensões, através de uma célula cúbica que permitiu a aplicação de cargas de forma independente em três dimensões, sendo submetidos os corpos de prova a um estado plano de deformações, priorizando-se os seguintes objetivos: primeiro analisar o comportamento mecânico de sistemas de contenção de areia em três casos, e segundo observar os efeitos físicos produzidos no *gravel pack*, quando submetido a um estado anisotrópico de tensões em uma formação com potencial de produção de sólidos. Os resultados foram satisfatórios mostrando em cada caso comportamentos similares, verificando-se que a tela centralizada com o gravel pack oferece melhores condições de suporte para a formação e para estabilidade do poço.

Palavras-chave

Gravel Pack; Simulação Física; Amostras de Grandes Dimensões; Produção de Sólidos.

Abstract

Chavez, Rafael Richie Lopez; Vargas Jr., Eurípedes do Amaral (Advisor).
Tests on a Large Cubic Cell for the Study of Solids Containment in Oil Wells. Rio de Janeiro, 2011. 111p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A major problem in the oil industry during the extraction of hydrocarbons is the production of solid sand grains that are usually generated from some consolidated formations, as in sandstones, may cause erosion on production lines, lifting equipment and surface coatings collapse and obstruction of the well. These and other related events account for this activity, high environmental and economic costs. In this dissertation was simulated experimentally the operation of solid containment systems used to more horizontal wells without coating, these tests were run on synthetic sandstone blocks of large dimensions, through a cubic cell which allowed the application of loads independently in three dimensions, and subjected the specimens to a state plan deformations, focusing on the following objectives: first to analyze the mechanical behavior of systems containing sand in three cases, and second to observe the physical effects produced in the gravel pack, when subjected to an anisotropic state of stresses in a formation with a production potential of solids. The results were satisfactory in each case showing similar behavior, verifying that the central screen with gravel pack offers better support for the formation and stability of the well.

Keywords

Gravel Pack; Physical Simulation; Large Scale Test; Solids Production.

Sumário

Lista de Símbolos	17
Lista de Abreviaturas	19
1 Introdução	20
1.1. Relevância da Pesquisa e Objetivos	21
1.2. Organização do Trabalho	21
2 Produção de Sólidos e Sistemas de Contenção	22
2.1. Considerações iniciais	22
2.2. Produção de Sólidos	23
2.2.1. Problemas Relacionados à Produção de Sólidos	23
2.2.2. Mecanismos de Produção de Sólidos	25
2.2.2.1 Ruptura por Cisalhamento	25
2.2.2.2 Ruptura por Tração	25
2.3. Métodos de Controle de Sólidos	26
2.3.1. Métodos Mecânicos	27
2.3.1.1. Tubos Ranhurados	27
2.3.1.2. Tubos Telados	28
2.3.1.3. Gravel Pack	31
2.4. Completação de Poços	32
2.4.1 Completação Gravel Packing	32
2.4.2 Completação Frac Pack	33
2.4.3 Completação Stand Alone	34
3 Fundamentos Teóricos	35
3.1. Introdução	35
3.2. Ensaios de Laboratório	36
3.3. Modos de Ruptura	37
3.4. Modos de Ruptura induzidos	39

4 Ensaaios Poliaxiais	40
5 Procedimento Experimental	44
5.1. Introdução	44
5.2. Célula Cúbica	44
5.2.1. Sistema de Válvulas	47
5.3. Confeção dos Corpos de Prova	49
5.4. Especificações e Instrumentação dos Tubos	51
5.4.1. Propriedades Químicas e Mecânicas	51
5.4.2. Medição das Deformações Circunferenciais	51
5.4.3. Medição de Deslocamentos Radiais	53
5.4.3.1. Construção do Transdutor de Deslocamentos	53
5.5. Outras especificações	57
5.5.1. Interface atuador-cubo	57
5.5.2. Lubrificante	57
5.5.3. Propriedades do agente de contenção	58
5.6. Casos Estudados	58
5.7. Preparação do Ensaio	60
5.8. Execução do Ensaio	61
5.8.1. Breakout com aplicação de carga no eixo “Y” até os 600 psi	61
5.8.2. Breakout com aplicação de carga no eixo “Y” até os 1000 psi.	63
5.8.3. Tela Centralizada com gravel pack	66
5.8.4. Tela Encostada com gravel pack	70
5.8.5. Stand Alone	73
6 . Apresentação e Análise dos Resultados	78
6.1. Considerações Iniciais	78
6.2. Resultados obtidos	78
6.2.1. Breakout com aplicação de carga no eixo “Y” até os 600 psi	78
6.2.2. Breakout com aplicação de carga no eixo “Y” até os 1000 psi	79
6.2.3. Tela Centralizada com gravel pack	80
6.2.4. Tela Encostada com gravel pack	86
6.2.5. Stand Alone	91

7 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	98
7.1. Conclusões	98
7.2. Sugestões para Trabalhos Futuros	99
Referências bibliográficas	100
Apêndice A. Tabelas de tensão vs deslocamento e tensão vs deformação.	106

Lista de figuras

Figura 2.1 – Esquema do transporte dos sólidos (Mendoza, 2003).	23
Figura 2.2 – Efeitos de erosão de <i>choke</i> , decorrentes da produção de sólidos (Da Silva, 2008).	24
Figura 2.3 – Diagrama de estabilidade para uma cavidade Morita (1989).	26
Figura 2.4 – Disposição de ranhuras no tubo (Borges, 2007)	28
Figura 2.5 – Tubo Telado Wire-wrapped	28
Figura 2.6 – Tubo Telado Premium.	29
Figura 2.7 – Tubo Telado Pré-empacotado.	30
Figura 2.8 – Detalhes de seções do Tubo Telado Pré-empacotado.	30
Figura 2.9 – Telado Expansível.	31
Figura 2.10 – <i>Gravel Pack</i> em poço revestido.	31
Figura 2.11 – Instalação do <i>Gravel Pack</i> do espaço anular.	32
Figura 3.1 – Tipos de ensaio (GMI, 2006).	36
Figura 3.2 – Representação esquemática das rupturas frágeis a dúcteis (adaptado Griggs e Handin, 1960).	38
Figura 3.3 – Modo de ruptura <i>Breakout</i> .	39
Figura 3.4 – Tipos de ruptura (a) frágil, (b) dúctil (Papamichos, 2008).	39
Figura 4.1 - Detalhes do esquema do sistema de ensaio poliaxial (Haimson e Chang, 2000).	41
Figura 4.2 – Equipamento utilizado por Haimson (2007).	42
Figura 4.3 – Célula cúbica para ensaios de estabilidade (Morita et al. 2002)	43
Figura 4.4 – Célula Cúbica do CENPES/PETROBRAS.	43
Figura 5.1 – Detalhes da célula cúbica (Bloch, 2003).	46
Figura 5.2 - Válvulas para acionamento da Célula Cúbica.	47
Figura 5.3 – Esquema do funcionamento das válvulas (Bloch, 2003).	48
Figura 5.4 – Válvulas da bomba secundária.	48
Figura 5.5 – Direções de aplicação de cargas no bloco e posição do furo.	49
Figura 5.6 – Corpos de prova sintéticos com as respectivas formas.	50
Figura 5.7 – <i>Strain gage</i> colados na superfície interna do tubo.	52
Figura 5.9 – 1º transdutor de deslocamento e dispositivo de calibração.	54
Figura 5.10 – Transdutor de deslocamentos.	54

Figura 5.11 (a) – Curva e constante da calibração do <i>clip gages 1</i> .	55
Figura 5.11 (b) – Curva e constante da calibração do <i>clip-gages 2</i> .	56
Figura 5.12 – Câmara filmadora Borescope, transdutor e tubos instrumentados.	56
Figura 5.14 – Cerâmica comercial Carbolite, malha 16/20.	58
Figura 5.15 – Retenção do gravel pack nos extremos nos furos do bloco.	60
Figura 5.16 – Transdutor de deslocamento no interior do tubo instrumentado.	61
Figura 5.17 - Vista das direções de aplicação de cargas no bloco.	62
Figura 5.18 – Câmara filmadora e led de iluminação instalada na placa do atuador.	62
Figura 5.19 - Bloco fraturado depois de encostar os atuadores.	64
Figura 5.20 - Tubo centralizado com o <i>gravel pack</i> 16/20.	67
Figura 5.21 – Tampa utilizada para manter o <i>gravel pack</i> .	68
Figura 5.23 – Tubo encostado com o <i>gravel pack</i> .	71
(a) – Instalação do tubo instrumentado e o tradutor de deslocamento.	72
Figura 5.24 (b) – Preenchimento com o <i>gravel pack</i> .	73
Figura 5.25 – Bloco com o sistema de contenção instrumentado.	74
(a) – Passagem de câmara filmadora através de um conduto de 13 mm de diâmetro	76
Figura 5.26 (b) – Instalação da câmara filmadora dentro do bloco.	76
Figura 6.1 – “Caso <i>Breakout</i> com aplicação de carga no eixo “Y” até os 600psi”, no minuto 22’00.	79
Figura 6.2 – “Caso <i>Breakout</i> com aplicação de carga no eixo “Y” até os 1000psi”, no minuto 19’00.	79
Figura 6.3 - Curvas dos deslocamentos no eixo Z e Y.	81
Figura 6.4 - Curvas dos deslocamentos no eixo “Z” e “Y”.	82
(a) – Fratura interna do bloco.	82
Figura 6.5 (b) – Fraturas no bloco A-1b.	83
Figura 6.6 - Esmagamento do tubo pelo fraturamento.	83
Figura 6.7 – Curva Tensão VS Deslocamento.	84
Figura 6.8 – Curva Tensão vs Deslocamento.	84
Figura 6.9 – Curva Tensão vs Deformação.	85
Figura 6.10 - Deformação do tubo pelas cargas aplicadas, segundo as curvas obtidas.	86
Figura 6.11 – Fraturamento do bloco B-1.	87

Figura 6.12 – Curva Tensão vs Deslocamento.	87
Figura 6.13 – Grãos de <i>gravel pack</i> mobilizados embaixo do tubo.	88
Figura 6.14 – Fraturamento do bloco B-2.	88
Figura 6.15 – Tensão vs Deslocamento.	89
Figura 6.16 – Tensão vs Deslocamento.	89
Figura 6.17 – Tensão vs Deformação.	90
Figura 6.18 – Bloco sem fraturas no final do ensaio.	91
Figura 6.19 – Interior do furo fraturado do bloco C-1.	91
Figura 6.20 – Tensão vs Deslocamento do bloco C-2.	92
Figura 6.21 – Tensão vs Deformação do Strain-lateral no bloco C-2.	93
Figura 6.22 – Tubo ovalizado pelos sólidos produzidos.	93
Figura 6.23 – Formato (<i>Breakout</i>) depois dos carregamentos.	94
Figura 6.24 – Bloco C-2 depois dos carregamentos.	94
Figura 6.25 – Sólidos produzidos no interior do furo.	95
Figura 6.26 – Curvas de tensão vs deformação do bloco C-3	95
Figura (a) – Bloco C-3 no final do ensaio.	96
Figura 6.27(b) – Bloco C-3 retirado da Câmara Cúbica.	96
Figura 6.28 – Tubo pressionado no bloco.	97

Lista de tabelas

Tabela 5.1 – Propriedades do arenito sintético	50
Tabela 5.2 – Propriedades do tubo de latão (Villarroel, 2009).	51
Tabela 5.3 - Seqüência de carregamentos aplicados no bloco.	63
Tabela 5.4 - Seqüência da aplicação de carregamentos no bloco.	65
Tabela 5.5 - Seqüência da aplicação de carregamentos no bloco.	66
Tabela 5.6 - Seqüência da aplicação de carregamentos no bloco.	67
Tabela 5.7 – Nova seqüência dos carregamentos aplicados no bloco.	68
Tabela 5.8 - Seqüência da aplicação de carregamentos no bloco .	69
Figura 5.22 - Seção transversal do tubo com o posicionamento dos <i>strain gage</i>	70
Tabela 5.9 - Seqüência da aplicação de carregamentos no bloco.	70
Tabela 5.10 - Seqüência dos carregamentos aplicados no bloco.	71
Tabela 5.11 - Seqüência dos carregamentos aplicados no bloco.	72
Tabela 5.12 - Seqüência dos carregamentos aplicados no topo.	73
Tabela 5.14 - Seqüência dos carregamentos aplicados no bloco.	77

Lista de quadros

Quadro 5.1 – Definição das linhas hidráulicas de acionamento da Célula Cúbica (Bloch, 2003).	47
---	----

Lista de Símbolos

Romanos

C	Coesão
E	Módulo de elasticidade
P	Pressão
X	Eixo principal menor
Y	Eixo principal intermediário
Z	Eixo principal maior

Gregos

ε	Deformação
ϕ	Ângulo de atrito
σ	Tensão
σ_1	Tensão principal maior
σ_2	Tensão principal intermediária
σ_3	Tensão principal menor
θ	Ângulo entre o ponto escolhido e a direção da tensão
ν	Coeficiente de Poisson

Lista de Abreviaturas

CP	Corpo de prova
CPs	Corpos de prova
TEP	Gerência de Tecnologia e Engenharia de Poços
RGO	Razão Gás Óleo
RAO	Razão Água Óleo