



**Aldenir Costa**

**Um Estudo Experimental Utilizado em  
Tomografia de Raio-X com Mecanismos  
Associados a Produção de Areia em  
Poços de Petróleo**

**Dissertação de Mestrado**

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

Orientador: Prof. Jaime Tupiassú Pinho de Castro

Co-Orientador: Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Jr.

Rio de Janeiro  
Janeiro de 2007



**Aldenir Costa**

**Um Estudo Experimental Utilizado em  
Tomografia de Raio-X com Mecanismos  
Associados a Produção de Areia em  
Poços de Petróleo**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Jaime Tupiassú Pinho de Castro**

Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

**Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Junior**

Co-Oreintador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

**Prof. Mauro Speranza Neto**

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

**Prof. Paulo Dore Fernandes**

CENPES/PETROBRAS

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 12 de janeiro de 2007

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

## **Aldenir Costa**

Eu sou graduado em Engenharia de Produção com ênfase em Mecânica, pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) em 2002. Terminei o curso de Mestrado em Engenharia Mecânica com especialização em Engenharia de Petróleo pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC) 2007. Tenho como principal interesse, atuar na área de Engenharia de Petróleo.

### Ficha Catalográfica

Costa, Aldenir

Um Estudo Experimental Utilizado em Tomografia de Raio-X com Mecanismos Associados a Produção de Areia em Poços de Petróleo / Aldenir Costa ; orientador: Jaime Tupiassú Pinho de Castro ; co-orientador: Eurípedes do Amaral Vargas Jr. – 2007.

125 f. ; 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. I. Castro, Jaime Tupiassú Pinho de. II. Vargas Junior, Eurípedes de Amaral. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV Título.

CDD: 621

## **Agradecimentos**

A Deus, meu mestre de toda jornada.

Aos meus orientadores, Dr. Vargas e Dr. Jaime, por todo suporte dado a este trabalho.

Ao CNPq e á PUC - Rio pelos recursos financeiros a pesquisa.

À Elisabete Campos e Fabiane, do Laboratório de Tomografia Computadorizada de Raios-X do CENPES, pela atenção, e disponibilidade de recursos para a realização deste trabalho.

Aos funcionários do CENPES: Marcos Dantas, Rodrigo Barra, Clemente Gonçalves, Marcos Soares, Júlio César Beltrami.

A todos os professores e funcionários e colegas da PUC pelos ensinamentos, amizade e espírito de colaboração.

A minha família pelo incentivo e apoio que me deram.

A minha noiva, Andréia, pelo companheirismo.

## Resumo

Costa, Aldenir; de Castro, Jaime Tupiassú Pinho (Orientador). **Um Estudo Experimental Utilizado em Tomografia de Raio-X com Mecanismos Associados a Produção de Areia em Poços de Petróleo**. Rio de Janeiro, 2007. 125p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Freqüentemente, durante os estágios de produção de um poço de óleo, ocorre a produção simultânea de partículas sólidas que originam da massa rochosa ao redor, um processo chamado de produção de areia. Concentrações de tensões nas vizinhanças do poço podem causar perda de coesão entre os grãos, criando assim uma região de matéria granular solta suscetível a ser arrastada pela força de infiltrações. Este trabalho se baseia no estudo da formação de danos nas vizinhanças do poço. Este programa experimental é conduzido ao simular, do interior de uma célula especialmente construída, as pressões crescentes durante esses estágios de escavação numa amostra de rocha, geralmente arenito, pouco consolidada ou um material montado artificialmente simulando arenito. Este processo é conduzido em tempo real dentro de tomógrafo computadorizado de Raio X. Os ensaios tiveram por objetivo identificar a pressão de início e o modo de propagação da ruptura da parede da cavidade interna da amostra ensaiada. Estes são estágios iniciais dos processos de produção de areia em rochas. As análises das imagens tomográficas adquiridas durante os ensaios permitiram a visualização de breakouts e arrombamentos dos poços. Estudos mais detalhados possibilitaram estimar a quantidade de areia produzida e reconstruir tridimensionalmente o processo de propagação de ruptura.

## Palavras-chave

Produção de Areia.

## Abstract

Costa, Aldenir; de Castro, Jaime Tupiassú Pinho (Advisor). **An Experimental Study Used in X-Ray Tomography with Mechanisms Associated the Sand Production in Oil Weels.** Rio de Janeiro, 2007. 125p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Frequently, during the production stages of an oil well, simultaneous production of solid particles originating from the surrounding rock mass occur, a process called sand production. Stress concentrations around of the well may cause loss of cohesion between grains, thus creating a region of loose granular matter susceptible for drag by seepage forces. The present work reports on the study of the formation of breakouts/damage around of the well. This experimental program is carried out by simulating, inside an especially constructed cell, the stresses arising during these excavation stages on a sample of a rock, generally a poorly consolidated sandstone or an artificially assembled material simulating a sandstone. This process is carried out in real time inside an X ray computerized tomography. The tests investigated the initial and the evolution of failure at the cavity wall of samples. These are initial stages of the sand production process. The analysis of the CT-scans obtained during tests allowed the visualization of breakouts and collapses of the wells. From studies more details were possible estimate the sand production and produce 3-D images of the propagation of the failure.

## Keywords

Sand Production.

## Sumário

1. Introdução	13
1.1. Produção de Areia	15
1.1.1. Problemas Decorrentes da Produção de Areia	15
1.1.2. Mecanismos da Produção de Areia	17
1.1.3. Estudos Experimentais de Alguns Autores a Produção de Areia	19
2. Tomografia Computadorizada de Raios - X	26
2.1. Fundamentos Teóricos de Tomografia Computadorizada de Raios X	26
2.1.1. Formação da Imagem	26
2.1.2. Escala de cores ou tons de cinza	27
2.2. Utilização da Tomografia Computadorizada de Raios X em Rochas	28
3. Programa Experimental	39
3.1. Caracterização dos Arenitos	39
3.1.1. Arenito Sergi	39
3.1.2. Arenito Sintético	43
3.2. Equipamentos Utilizados	47
3.2.1. Célula de Pressão	47
3.2.2. Pressurizador	51
3.2.3. Atuador Hidráulico Manual	56
3.2.4. Tomógrafo	57
3.3. Preparação dos Corpos de Prova	58
3.4. Metodologia de Ensaio	59
4. Resultados	65
4.1. Metodologia	65
5. Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	122
6. Referências bibliográficas	124

## Lista de figuras

Figura 1.01 – Retração do cimento (Dusseault & Santarelli, 1989)	18
Figura 1.02 – Plastificação no canhoneamento (Dusseault & Santarelli, 1989)	19
Figura 1.03 – Vaso de pressão aplicado em experimentos de cavidades com aplicação de fluxo (Tronvoll & Fjær, 1994)	20
Figura 1.04 – Imagens de seções transversais de duas amostras após o ensaio: (a) tamanho médio de grãos constituinte igual a 250 $\mu\text{m}$ , e (b) 100 $\mu\text{m}$ . (Tronvoll <i>et al.</i> 1997)	22
Figura 1.05 – Esquema do fluxo radial no ensaio de produção de areia com amostra de 200 mm de diâmetro externo (Vardoulakis <i>et al.</i> , 2001)	23
Figura 1.06 – Total acumulado da produção de areia versus tensão externa (Vardoulakis <i>et al.</i> , 2001)	24
Figura 1.07 – Total acumulado da produção de areia versus tempo com várias taxas de fluxo e pressão confinante igual a 11 Mpa (Vardoulakis <i>et al.</i> , 2001)	24
Figura 1.08 – Imagens tomográficas após o ensaio: (a) Seção longitudinal, (b) seção transversal do topo, (c) (meio) e (d) base do corpo de prova (Vardoulakis <i>et al.</i> , 2001)	25
Figura 2.01 – Escala de cores (A) e das tonalidades de cinza (B)	27
Figura 2.02 – Processo de Saturação por água observada por imagens Tomográficas. O avanço da região mais clara nas figuras representa o aumento da densidade pela invasão da água nos poros da rocha	29
Figura 2.03 – Posicionamento da célula triaxial na mesa do Tomógrafo	30
Figura 2.04 – Imagem Longitudinal do corpo de prova apresentando o plano de cortes	30
Figura 2.05 – Gráfico ensaio Uniaxial SER -1	31
Figura 2.06 – Seções transversais do corpo de prova SER-1 com Tensão axial nula	32
Figura 2.07 – Seções transversais do corpo de prova SER-1 com Tensão axial (18 bar (1,8 MPa), após 33 minutos de ensaio. Neste ponto, foi o início de ruptura do ensaio	33
Figura 2.08 – Seções transversais do corpo de prova SER-1 com Tensão axial (31,5 bar (3,2 MPa), no fim do ensaio	34
Figura 2.09 – Piloto do corpo de prova SER-1 com Tensão axial nula	35
Figura 2.10 – Piloto do corpo de prova SER-1 com Tensão axial de 18 bar (1,8 MPa), após 30 minutos de ensaio. Observa-se o início da fratura se propagando nas proximidades centrais do corpo de prova	35
Figura 2.11 – Piloto do corpo de prova SER-1 com tensão axial de 26,5 bar (2,7 MPa) 44:13s do início do ensaio	36
Figura 2.12 – Piloto do corpo de prova SER -1 com tensão axial de 31,5bar (3,2MPa), no fim do ensaio com 53 minutos	36
Figura 2.13 – Instantâneo da reconstrução 3D no início do ensaio	37
Figura 2.14 – Instantâneo da reconstrução 3D com tensão axial de 2,1MPa, após 35 minutos do início do ensaio	37
Figura 2.15 – Instantâneo da reconstrução 3D com tensão axial de 2,5MPa, após 40:49s minutos do início do ensaio	38
Figura 2.16 – Instantâneo da reconstrução 3D com tensão axial de 3,2MPa, após 53:00s minutos do início do ensaio	38
Figura 3.01 – Roteiro para confecção de lâminas delgadas impregnadas (Cesero <i>et al.</i> , 1989)	41
Figura 3.02 – Cimentação de Sílica e poros encontrados nos arenitos	42



Figura 3.03 – Curva Tensão x Deformação axial da amostra 13A	45
Figura 3.04 – Curva Tensão x Deformação axial das amostras	46
Figura 3.05 – Curva Deformação Axial x deformação Vol. das amostras	46
Figura 3.06 – Projeto da célula de Pressão	48
Figura 3.07 – Detalhe da câmera de tensão axial no projeto da célula	49
Figura 3.08 – Fotografia da Célula	50
Figura 3.09 – Fotografia do controlador/Atuador Pressurizador	51
Figura 3.10 – Cadastro do Corpo de Prova	52
Figura 3.11 – Cadastro do Corpo de Prova	53
Figura 3.12 - Cadastro do Corpo de Prova	54
Figura 3.13 – Tela de entrada do ensaio	55
Figura 3.14 – Tela de entrada do ensaio	56
Figura 3.15 – Tomógrafo Médico	57
Figura 3.16 – Corpos de prova após a perfuração: á esquerda arenito sintético e à direita arenito Sergi	58
Figura 3.17 – Montagem do corpo de prova. Os caps estão envolvidos com fita alta fusão	59
Figura 3.18 – Soprador térmico e corpo de prova envolvido pela membrana termo-retrátil	60
Figura 3.19 – Retração da membrana devido ao calor	60
Figura 3.20 – Amarração com arame	61
Figura 3.21 – Colocação do corpo de prova	61
Figura 3.22 – Colocação do óleo na célula	62
Figura 3.23 – Colocação do êmbolo superior	62
Figura 3.24 – Travamento do sistema com a tampa rosqueada	63
Figura 3.25 – Visão geral do ensaio	63
Figura 3.26 – Detalhes do posicionamento da célula	64
Figura 4.01 – Imagem Longitudinal do corpo de prova apresentando o plano de cortes	66
Figura 4.02 – Seções transversais do corpo de prova 4C com pressão confinante nula	69
Figura 4.03 – Seções transversais do corpo de prova 4C com pressão confinante de 9,9MPa. Nota-se na seção 65,00 mm o início do breakout	70
Figura 4.04 – Seções transversais do corpo de prova 4C com pressão confinante de 40MPa	71
Figura 4.05 – Seqüência da formação de breakout na seção 65,00 mm no estágio 0 ao estágio 15	72
Figura 4.06 – Subtração de imagens do corpo de prova 4C no estágio 0 menos as do estágio 15. Nota-se praticamente o preenchimento de praticamente todas as cavidades interna por material granular	73
Figura 4.07 – Imagens Pilotos antes e após o ensaio	75
Figura 4.08 – Corpo de prova 4C após o ensaio. Nota-se o preenchimento de praticamente toda a cavidade interna	75
Figura 4.09 – Seções Transversais do corpo de prova 5B com pressão confinante nula	76
Figura 4.10 – Seções Transversais do corpo de prova 5B com pressão confinante de 8,8MPa. Nota-se na seção 64,82 mm o início do breakout	77
Figura 4.11 – Seções Transversais do corpo de prova 5B com pressão confinante de 40MPa	78
Figura 4.12 – Seqüência da formação de breakout na seção 64,82 mm no estágio 0 ao estágio 15	79
Figura 4.13 – Subtração de imagens do corpo de prova 5B no estágio 0 menos as do estágio 15. Nota-se praticamente o preenchimento de praticamente todas as cavidades interna por material granular	80

Figura 4.14 – Imagens Pilotos antes e após o ensaio	82
Figura 4.15 – Corpo de prova 5B após o ensaio. Nota-se o preenchimento de praticamente toda a cavidade interna	82
Figura 4.16 – Seções Transversais do corpo de prova 9 com pressão confinante nula	83
Figura 4.17 – Seções Transversais do corpo de prova 9 com pressão confinante de 8,1MPa. Nota-se na seção 4,75 mm o início do breakout. É visto um enfraquecimento do material ao redor da cavidade circular. A sua densidade diminui.	84
Figura 4.18 – Seções Transversais do corpo de prova 9 com pressão confinante de 40MPa. No fim do ensaio, as cavidades são praticamente todas preenchidas. Também foi verificado um aumento da densidade das seções de acordo com o aumento do carregamento.	85
Figura 4.19 – Seqüência da formação de breakout na seção 4,75 mm no estágio 0 ao estágio 15	86
Figura 4.20 – Subtração de imagens do corpo de prova 9 no estágio 0 menos as do estágio 15. Nota-se praticamente o preenchimento de praticamente todas as cavidades interna por material granular	87
Figura 4.21 – Imagens Pilotos antes e após o ensaio	89
Figura 4.22 – Corpo de prova 9 após o ensaio. Nota-se o preenchimento de praticamente toda a cavidade interna	89
Figura 4.23 – Seções transversais do corpo de prova 10B com pressão confinante nula	90
Figura 4.24 – Seções transversais do corpo de prova 10B com pressão confinante de 18MPa. Nota-se na seção 30,00 mm o início do breakout. É visto um enfraquecimento do material ao redor da cavidade circular. A sua densidade diminui.	91
Figura 4.25 – Seções Transversais do corpo de prova 10B com pressão confinante de 40MPa. No fim do ensaio, as cavidades são praticamente todas preenchidas. Também foi verificado um aumento da densidade das seções de acordo com o aumento do carregamento.	92
Figura 4.26 – Seqüência da formação de breakout na seção 30,00 mm no estágio 0 ao estágio 7	93
Figura 4.27 – Subtração de imagens do corpo de prova 10B no estágio 0 menos as do estágio 7. Nota-se praticamente o preenchimento de praticamente todas as cavidades interna por material granular	94
Figura 4.28 – Imagens Pilotos antes e após o ensaio	96
Figura 4.29 – Corpo de prova 10B após o ensaio. Nota-se o preenchimento de praticamente toda a cavidade interna	96
Figura 4.30 – Seções transversais do corpo de prova 8B com pressão confinante nula	97
Figura 4.31 – Seções transversais do corpo de prova 8B com pressão confinante de 18MPa. Nota-se na seção 65,00 mm o início do breakout. É visto um enfraquecimento do material ao redor da cavidade circular. A sua densidade diminui.	98
Figura 4.32 – Seções Transversais do corpo de prova 8B com pressão confinante de 40MPa. Também foi verificado um aumento da densidade das seções de acordo com o aumento do carregamento.	99
Figura 4.33 – Seqüência da formação de breakout na seção 65,00 mm no estágio 0 ao estágio 7	100
Figura 4.34 – Subtração de imagens do corpo de prova 8B no estágio 0 menos as do estágio 7. Nota-se praticamente o preenchimento de praticamente todas as cavidades interna por material granular	101
Figura 4.35 – Imagens pilotos antes e após o ensaio	103

Figura 4.36 – Corpo de prova 8B após o ensaio. Nota-se o preenchimento de praticamente toda a cavidade interna	103
Figura 4.37 – Seções Transversais do corpo de prova 3B com pressão confinante nula	104
Figura 4.38 – Seções Transversais do corpo de prova 3B com pressão confinante de 19,6MPa. Nota-se na seção 80,25 mm o início do breakout	105
Figura 4.39 – Seções Transversais do corpo de prova 3B com pressão confinante de 40MPa	106
Figura 4.40 – Seqüência da formação de breakout na seção 80,20 mm no estágio 0 ao estágio 5	107
Figura 4.41 – Subtração de imagens do corpo de prova 3B no estágio 0 menos as do estágio 5. Nota-se praticamente o preenchimento de praticamente todas as cavidades interna por material granular	108
Figura 4.42 – Corpo de prova 3B após o ensaio. Nota-se o preenchimento de praticamente toda a cavidade interna	110
Figura 4.43 – Seções Transversais do corpo de prova S-1 com pressão confinante nula	111
Figura 4.44 – Seções transversais do corpo de prova S-1 com pressão confinante 2,6Mpa. Nota-se na seção 25,13mm o início do breakout. É visto um enfraquecimento do material ao redor da cavidade circular. A sua densidade diminui.	112
Figura 4.45 – Seções Transversais do corpo de prova S-1 com pressão confinante de 2,8MPa. Na cavidade das seções, é observado o breakout com a forma em “V”. Nas últimas seções, ocorreu invasão do fluido devido ao rompimento da membrana, e com isso um aumento da densidade	113
Figura 4.46 – Seqüência da formação de breakout na seção 25,13 mm no estágio 0 ao estágio 3	114
Figura 4.47 – Imagens Pilotos antes e após o ensaio. Com o colapso global, a membrna foi danificada permitindo que o óleo contaminasse a amostra	114
Figura 4.48 – Seções Transversais do corpo de prova S-2 com pressão confinante nula	115
Figura 4.49 – Seções Transversais do corpo de prova S-2 com pressão confinante de 14,1MPa. Nota-se na seção 35,00 mm o início do breakout. É visto um enfraquecimento do material ao redor da cavidade circular. A sua densidade diminui.	116
Figura 4.50 – Seções Transversais do corpo de prova S-2 com pressão confinante de 17MPa. Na cavidade das seções, é observado o breakout com a forma em “V”	117
Figura 4.51 – Seqüência da formação de breakout na seção 35,00 mm no estágio 0 ao estágio 6	118
Figura 4.52 – Subtração de imagens do corpo de prova S-2 no estágio 0 menos as do estágio 6. Nota-se um pequeno acúmulo de areia. Nota-se o um pequeno acúmulo de areia nas cavidade internas por material granular	119
Figura 4.53 – Instantâneo da reconstrução 3D no início do ensaio	121
Figura 4.54 – Instantâneo da reconstrução 3D no estágio 1	121
Figura 4.55 – Instantâneo da reconstrução 3D no estágio 6	121

## Lista de tabelas

Tabela 3.01 – Caracterização do Arenito Sergi	42
Tabela 3.02 – Classificação do Arenito Sergi estudados	42
Tabela 3.03 – Porosidade aparente das amostras do Arenito Sintético	44
Tabela 4.01 – Características dos corpos de prova	65
Tabela 4.02 – Estimativa da área do <i>breakout</i> e da quantidade de areia produzida para o corpo de prova 4C	74
Tabela 4.03 – Estimativa da área do <i>breakout</i> e da quantidade de areia produzida para o corpo de prova 5B	81
Tabela 4.04 – Estimativa da área do <i>breakout</i> e da quantidade de areia produzida para o corpo de prova 9	88
Tabela 4.05 – Características dos corpos de prova	89
Tabela 4.06 – Estimativa da área do <i>breakout</i> e da quantidade de areia produzida para o corpo de prova 10B	95
Tabela 4.07 – Estimativa da área do <i>breakout</i> e da quantidade de areia produzida para o corpo de prova 8B	102
Tabela 4.08 – Estimativa da área do <i>breakout</i> e da quantidade de areia produzida para o corpo de prova 3B	109
Tabela 4.09 – Características dos corpos de prova	110
Tabela 4.10 – Estimativa da área do <i>breakout</i> e da quantidade de areia produzida para o corpo de prova S-2	120