

METODOLOGIA PARA ASSENTAMENTO DE SAPATAS DE REVESTIMENTO, ESCOLHA DE PESO DE FLUIDO E TEMPO DE PERFURAÇÃO BASEADO NO MÉTODO DA JANELA OPERACIONAL

Victória Alles Santana de Jesus ^[1]; Maria Fernanda Oliveira Santos ^[2]; Hariel Udi Santana Mendes ^[3]; João Paulo Lobo dos Santos ^[4]

^[1] Universidade Federal de Sergipe, Núcleo de Engenharia de Petróleo – victoria_alles1@hotmail.com

^[2] Universidade Federal de Sergipe, Núcleo de Engenharia de Petróleo – nandynhajib@hotmail.com

^[3] Universidade Federal de Sergipe, Núcleo de Engenharia de Petróleo – harieludi@hotmail.com

^[4] Universidade Federal de Sergipe, Núcleo de Engenharia de Petróleo – jplobo2011@gmail.com

Resumo

Constantemente a indústria petrolífera, em específico a área da construção de projetos de poços, encontra-se em grandes desafios. Um destes é a execução de um projeto com o menor custo, melhor tempo de operação, maior lucratividade e maior segurança tanto operacional quanto ambiental. Para que esses desafios sejam vencidos, há necessidade do estudo da área, dos dados de locação, da trajetória do poço, da determinação das geopressões. Além disso, os parâmetros como o assentamento das sapatas de revestimento, determinação do peso de fluido de perfuração, escolha do diâmetro dos revestimentos e das respectivas brocas, seleção do BOP adequado, são etapas que influenciam diretamente na otimização tanto do custo quanto do tempo de operação. Neste trabalho serão apresentados dois projetos de poço de desenvolvimento utilizando a metodologia baseada somente na janela operacional, sendo que o Projeto A utiliza margem de segurança de 0,5 lb/gal para o gradiente de poros e o Projeto B considera a margem de segurança tanto para o gradiente de poros quanto para o gradiente de fratura, com o objetivo de definir qual mais econômico através da estimativa do custo e do tempo de operação.

Palavras-chave: Geopressões; assentamento de sapatas; peso de fluido; projeto de poço.

1. Introdução

Um dos principais desafios dos engenheiros da indústria de petróleo é elaborar um projeto de qualidade baseando-se no estudo das geopressões, minimizando o elevado custo da perfuração do poço e o tempo de operação. Isto justifica a elaboração de projetos eficientes que buscam evitar problemas como: torques e arrastes elevados, aprisionamento da coluna de perfuração e influxo de fluidos da rocha para o poço (*kick*), o que, se não controlado, pode resultar em um *blowout* [1].

Além disso, ao perfurar as zonas críticas de alta pressão ou de formações não consolidadas, tem-se necessidade de revestir o poço, com a finalidade de selar essas zonas e impedir a ocorrência de desmoronamento ou contaminação da formação por fluido de perfuração [2]. Desta forma, faz-se necessário a seleção do melhor equipamento de segurança (BOP) e do peso fluido de perfuração adequado para cada fase do poço.

As geopressões englobam todas as pressões e tensões existentes na subsuperfície e as que são impostas a formação [3]. Neste trabalho, serão abordadas algumas delas, como a tensão de

sobrecarga, definida como a pressão a uma certa profundidade exercida pelo peso total das camadas sobrepostas [3]; a pressão de poros, definida como a pressão que o fluido exerce no interior dos poros do solo e da rocha [4]; e a pressão de fratura que é a pressão que leva à falha da rocha por tração [5].

Este trabalho tem como objetivo a elaboração de dois projetos de poço utilizando como metodologia de assentamento de sapatas de revestimento somente a janela operacional, construída através das geopressões, sendo que no Projeto A é utilizado uma margem de segurança de 0,5 lb/gal para o gradiente de poros e no Projeto B é utilizada uma margem de segurança de 0,5 lb/gal tanto para o gradiente de poros quanto para o gradiente de fratura. Após a elaboração do projeto, são definidos os pesos do fluido de perfuração para cada fase da perfuração do poço, é escolhido o BOP (*Blowout Preventer*) e é estimado o tempo de perfuração do poço.

2. Metodologia

2.1 Dados de Entrada dos Projetos

Utilizando os dados fornecidos nas Tabelas 1 e 2 foi possível construir os dois projetos de poço.

Tabela 1: Tempo de trânsito para cada intervalo de formação dentro do poço. Adaptado de [5].

Prof. m	Δt (μs/ft)										
1 400	165	2 550	105	3 700	90	2 000	135	3 150	74	4 300	105
1 450	158	2 600	104	3 750	89	2 050	133	3 200	78	4 350	115
1 500	155	2 650	110	3 800	87	2 100	132	3 250	76	4 400	108
1 550	148	2 700	99	3 850	95	2 150	126	3 300	80	4 450	106
1 600	149	2 750	93	3 900	96	2 200	123	3 350	77	4 500	105
1 650	145	2 800	92	3 950	98	2 250	125	3 400	81	4 550	103
1 700	142	2 850	89	4 000	100	2 300	124	3 450	78	4 600	102
1 750	141	2 900	76	4 050	105	2 350	121	3 500	82	4 650	101
1 800	149	2 950	85	4 100	99	2 400	118	3 550	79	4 700	99
1 850	140	3 000	77	4 150	110	2 450	119	3 600	85		
1 900	138	3 050	81	4 200	102	2 500	115	3 650	80		
1 950	137	3 100	75	4 250	110						

Tabela 2: Dados gerais. Adaptado de [5].

Lâmina d'água	Profundidade final	Air Gap	Valores de <i>leak off test</i> para a área	Assentamento da sapata (Projeto A e B)
1175 m	4700m	25 m	11,1lb/gal para 2000 m 12,3 lb/gal para 3000 m 15,4 lb/gal para 4000 m	Diferencial de pressão entre o poço e a formação de 2 000 psi.

2.2 Procedimento para determinação da janela operacional

A janela operacional é determinada pela pressão de poros (limite inferior) e a pressão de fratura (limite superior). Esta, além de manter o poço em condições seguras de operação define o intervalo de variação permitido do fluido a ser usado na perfuração sem causar danos ao poço [5]. Para elaborar a janela operacional, foram estimados os gradientes de poros e os gradientes de fratura. Estes dependem do Gradiente de Sobrecarga (G_{ov}), expresso pela Equação 1. Vale destacar que o gradiente de sobrecarga depende da tensão de sobrecarga (σ_{ov}) conforme expresso na Equação 2. A densidade de cada camada

de formação (ρ_{bi}), pode ser calculada através da Correlação de Gardner, pois além de ser confiável e simples é muito aplicada na indústria de petróleo [5]. Este método faz a correlação da densidade (ρ) com o tempo de trânsito, expressa pela Equação (3).

$$G_{ov} = \frac{\sigma_{ov}}{C * D} \quad (1) \quad \sigma_{ov} = 1,422 * (\rho_w * D_w + \sum_i^n \rho_{bi} * \Delta D_i) \quad (2) \quad \rho = a \left(\frac{10^6}{\Delta t} \right)^b \quad (3)$$

Onde: ρ_w é a massa específica da água (g/cm^3). ΔD_i é o intervalo de profundidade (m); C é a constante de conversão e D é a profundidade vertical; Δt é o tempo de trânsito ($\mu\text{s}/\text{ft}$); a e b são constantes empírica (valores usuais iguais a 0,23 e 0,25, respectivamente, definido para o Golfo do México).

Para a estimativa do Gradiente de Poros (G_P) pode ser utilizado os seguintes métodos: Razão, Profundidade Equivalente e Eaton [5], conforme equação (4). Foi preferível utilizar este último, pois além de ser simples e prático para aplicações é um dos mais usados na indústria de petróleo [6]. Vale salientar que foi utilizado o expoente 2 apresenta um melhor ajuste da janela operacional, já que com o expoente 3 os valores de gradiente de poros em algumas profundidades ficavam muito abaixo do gradiente de poros normal.

$$G_P = G_{ov} - \left[(G_{ov} - G_N) \times \left(\frac{\Delta t_n}{\Delta t_o} \right)^2 \right] \quad (4)$$

Onde: G_N é o gradiente de pressão de poros normal (lb/gal), usualmente definido como 8,5 lb/gal ; Δt_o é o tempo de trânsito observado (real) e Δt_n é o valor de trânsito da reta normal.

Além disso, com os dados de tempo de trânsito observados e as profundidades plotou-se o gráfico conforme a Figura 1 para abstrair dados a serem utilizados no cálculo do valor do tempo de trânsito da reta normal (Δt_n).

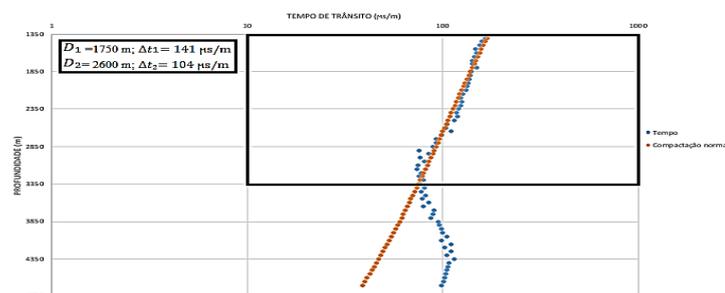


Figura 1: Tempo de trânsito para cada intervalo de formação dentro do poço. Próprio autor.

Foi calculado o valor do coeficiente angular da reta de tendência de compactação normal do gráfico Semilog (figura 1). Este cálculo é realizado através da Equação (5). Onde Δt_1 e Δt_2 são valores de tempo de trânsito na região de compactação normal contidos na reta de tendência e D_1 e D_2 são suas respectivas profundidades. Com o coeficiente angular, foi calculado os

valores de tempo de trânsito da reta normal (Δt_n), conforme a Equação (6).

$$m = \frac{\log(\Delta t_2) - \log(\Delta t_1)}{D_2 - D_1} \quad (5) \quad \Delta t_n = \Delta t_1^{(m \cdot (D - D_1))} \quad (6)$$

Para a estimativa do Gradiente de Fratura (G_F) existem seguintes métodos: Correlações Específicas, Método das Tensões Tangenciais e Tensões Mínimas [5]. Foi preferível utilizar este último pois é o mais simples e bastante aplicado na indústria petrolífera. Inicialmente, calculou-se o K real através da Equação (7). Este depende do G_P , do G_{ov} e dos dados de *LeakOff Test* (LOT) fornecidos na Tabela 2. Com os dados da profundidade de sedimentos (D_s) e K real foi construído o gráfico apresentado na Figura 2 através do software SciDAVis onde os parâmetros de ajuste a e b do gráfico foram substituídos na equação (8) e assim obtido o valor de K. Esse valor foi substituído na equação (9) que é referente ao método da tensão mínima e assim obteve-se o gradiente de fratura.

$$K = \frac{LOT - G_P}{G_{ov} - G_P} \quad (7) \quad K = a \times \ln(D_s) + b \quad (8) \quad G_F = G_P + K(G_{ov} - G_P) \quad (9)$$

Tabela 3: Estimativa de K para cada LOT. Próprio autor.

Prof.(m)	Prof. Sedim. (m)	LOT (lb/gal)	Sobrecarga(lb/gal)	Poros(lb/gal)	K(real)
2000	800	11,1	11,9450759	8,976129707	0,715362
3000	1800	12,3	14,26306553	5,50161082	0,753116
4000	2800	15,4	15,71532142	14,07608905	0,807641

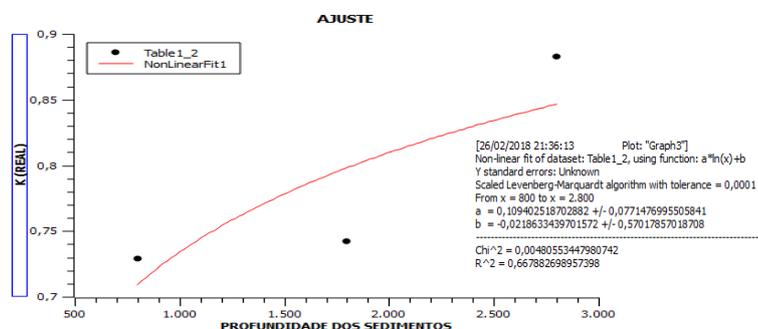


Figura 2: Ajuste logarítmico do K real versus profundidade de sedimentos. Próprio autor.

2.3 Procedimento para determinação do assentamento de sapatas:

Neste trabalho, utilizou-se o critério de assentamento baseado unicamente na janela operacional. Este método consiste em traçar de baixo para cima uma reta vertical, ou seja, do limite inferior até o limite superior da janela operacional [5]. O ponto em que há cruzamento dessas retas significa onde deve-se assentar uma sapata (Figura 3).

Vale destacar que nas profundidades onde houve regressão do gradiente de poros foi feito o cálculo de diferencial de pressão (ΔP) a que o poço está sujeito através da Equação (10), onde ρ_m é a densidade do fluido e D é a profundidade. Na profundidade em que o diferencial atingiu 2000 psi conforme descrito nos dados do projeto assentou-se um revestimento.

$$\Delta P = 0,1704 * (\rho_m - G_p) * D \quad (10)$$

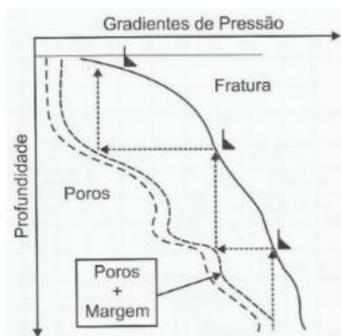


Figura 3: Assentamento de sapata com base na janela operacional [5].

2.4 Procedimento para definição do peso de fluido:

Nesta etapa definiu-se um peso de fluido de perfuração dentro de uma faixa entre os gradientes de poros e os de fratura para cada fase do poço nos dois projetos. Dessa forma, podendo evitar problemas operacionais como o kick ou fratura da formação.

2.5 Procedimento para seleção do BOP:

O BOP (*BlowOut Preventer*) é um conjunto de válvulas instaladas na cabeça do poço que podem ser fechadas em caso de um influxo dos fluidos provenientes da formação para o poço [5]. Para ambos projetos as seleções do BOP foram baseadas em dois métodos: Máxima Pressão de Poros através da Equação (11) e Gradiente de Fratura da Formação mais Fraca através da Equação (13).

$$P_{BOP} = 0,1704 * D_h * G_{p \max} - P_{H \text{ gas}} \quad (11)$$

$$P_{H \text{ gas}} = 0,1704 * (D_h - D_{BOP}) * \rho_{\text{gas}} \quad (12)$$

$$P_{BOP} = 0,1704 * D_h * G_F - P_{H \text{ gas}} \quad (13)$$

$$P_{H \text{ gas}} = 0,1704 * (D_{cg} - D_{BOP}) * \rho_{\text{gas}} \quad (14)$$

Onde: $G_{p \max}$ é o gradiente de pressão de poros que leve ao máximo valor na superfície (lb/gal); ρ_{gas} é a densidade do gás (lb/gal); D_{cg} é a profundidade da sapata (m).

Posteriormente, foi feita a seleção do BOP com base nos equipamentos de segurança disponíveis no mercado que são 5 000 psi, 10 000 psi ou 15 000 psi [5].

2.6 Procedimento para a definição do tempo de perfuração:

Para a determinação do tempo de perfuração dos projetos foi levado em consideração dados encontrados para um poço de correlação em [5]. Esses dados foram transferidos para o software *WebPlotDigitizer* que auxiliou na precisão da coleta de informações do tempo de perfuração de cada fase.

3. Resultados e Discussões

Todos os resultados referentes aos cálculos citados anteriormente foram primordiais na construção da janela operacional de ambos projetos. As figuras 4 e 5 representam a janela operacional de ambos projetos.

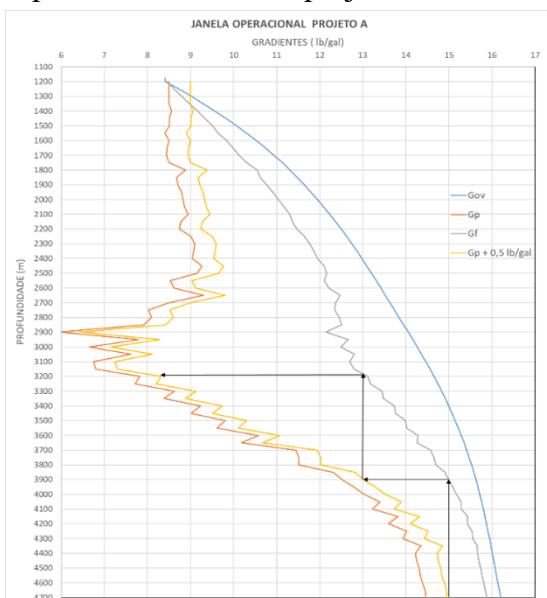


Figura 4: Janela Operacional Projeto A. Próprio autor.

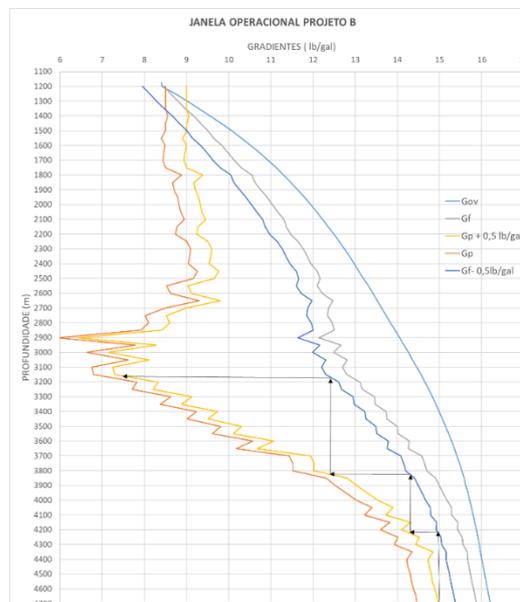


Figura 5: Janela Operacional Projeto B. Próprio autor.

Nos gráficos da janela operacional dos dois projetos houve uma regressão do gradiente de poros o que leva a grande diferencial de pressão entre o poço e a formação e consequentemente pode causar danos à formação e prisão por diferencial de pressão. Por isso foi feito os cálculos de diferencial de pressão para assentar um revestimento quando o diferencial for superior a 2000 psi, ou seja, o que ocorreu na profundidade de 2900 m. Dessa forma, reduziu-se o peso de fluido para evitar os problemas citados anteriormente.

No projeto A os assentamentos seriam em 4700 m, 3900 m e 3200 m, 2900 m, 1700 m e 1250 m. Porém, como as profundidades de locação de sapata em 2900 m e outra em 3200 m ficaram bastante próximas e consequentemente inviável por conta do custo e tempo de operação, foi preferível permanecer com os assentamentos conforme descrito na Tabela 4. No projeto B os assentamentos seriam em 4700 m, 4210 m, 3840 m, 3280 m, 2900 m, 1700 m e 1250 m. Porém, como as profundidades de locação de sapata em 3280 m e 4210 m ficaram bastante próximas das demais e consequentemente inviável por conta do custo e tempo de operação, foi preferível permanecer com os assentamentos conforme descrito na Tabela 4.

Tabela 4: Profundidade de cada revestimento. Próprio autor.

Revestimento	Profundidade (m)	
	Projeto A	Projeto B
Revestimento Condutor	1250	1250
Revestimento de Superfície	1700	1700
Revestimento Intermediário 1	2900	2900
Revestimento Intermediário 2	3900	3840
Revestimento de produção	4700	4700

Ao analisar a janela operacional obteve-se que para ambos projetos o valor máximo de pressão de poros foi de 11 583 psi, onde corresponde uma profundidade de 4 700 m e o G_p equivalente a 14,96 lb/gal. Esses dados foram aplicados na Equação (11) e resultou em uma pressão máxima do BOP conforme explícito na Tabela 5. Além disso, a pressão de fratura máxima obtida nos dois projetos foi de 3059,5 psi onde corresponde a uma profundidade de 4700m. No projeto A o G_p equivalente a essa profundidade foi de 15,87 lb/gal. Já no projeto B foi de 15,37 lb/gal. Esses dados foram aplicados na Equação (13) e resultou em uma pressão de BOP conforme Tabela 5.

Tabela 5: Pressão máxima do BOP. Próprio autor.

Método baseado no máximo gradiente de poros	Método baseado no gradiente de fratura da formação mais fraca	
Ambos Projetos	Projeto A	Projeto B
10 790, 42 psi	11 522,45psi	11 122,01 psi

Logo, baseado nos equipamentos de segurança disponíveis no mercado foi escolhido para ambos projetos o BOP de 15 000 psi. Posteriormente, após a avaliação do assentamento de sapata, obteve-se a faixa peso de fluido ideal para cada fase, conforme representados na Tabela 6.

Tabela 6: Peso de fluido para respectivas profundidades de ambos projetos. Próprio autor.

Projeto A		Projeto B	
PROFUNDIDADE (m)	ρ (lb/gal)	PROFUNDIDADE (m)	ρ (lb/gal)
De 1200 à 1250	8,5	De 1200 à 1250	8,5
De 1250 à 1700	9,0	De 1250 à 1700	9,0
De 1700 a 2900	10,0	De 1700 a 1900	9,5
		De 1900 à 2900	10,0
De 2900 à 3300	9,2	De 2900 à 3300	9,2
De 3300 à 3900	13,0	De 3300 à 3840	12,7
De 3900 à 4700	14,9	De 3840 à 4700	14,9

Finalmente, através dos resultados do *software WebPlotDigitizer* foi necessário realizar uma de regra de três para relacionar o tempo e profundidade do revestimento fornecido pelo poço de correlação em [5] com ambos projetos e assim obter o tempo de operação conforme tabela 7.

Tabela 7: Tempo necessário para perfuração em cada projeto. Próprio autor.

Revestimento (m)	Tempo (Dias)	Revestimento (m)	Tempo (Dias)
Revestimento Condutor 1250m	1	Revestimento Condutor 1250m	1
Revestimento de Superfície 1700m	33	Revestimento de Superfície 1700m	33
Revestimento Intermediário (1) 2900m	31	Revestimento Intermediário (1) 2900m	31
Revestimento Intermediário (2) 3900 m	27	Revestimento Intermediário (2) 3700m	27
Revestimento de Produção 4700m	36	Revestimento de Produção 4700 m	44
Total:	128	Total:	136

4. Conclusão

Ao realizar os projetos através do método da janela operacional verificou-se a sua eficiência quanto à certificação da segurança do poço. Essa eficiência se resume em utilizar os métodos de construção da janela operacional adequados em menor custo e tempo. Neste trabalho foi enfatizado o tempo de operação, já que este é um fator primário e decisivo para custo e, conseqüentemente, para a seleção do projeto mais produtivo economicamente.

Ambos projetos levaram em consideração o mesmo poço, diferindo apenas as margens de segurança adicionado aos respectivos gradientes. Foi possível realizar uma análise crítica sobre o assentamento de sapatas, peso de fluido, seleção de BOP e tempo de operação. Nos projetos obteve-se a mesma quantidade de sapata e mesma seleção do BOP. Já o peso de fluido variou por causa do intervalo entre as margens e o tempo diferiu-se devido ao comprimento de cada revestimento.

No projeto A obteve-se um tempo operacional menor que o projeto B, ou seja, para garantir uma maior segurança o tempo de operação e, conseqüentemente, o custo serão maiores.

Para trabalhos futuros, sugere a continuação deste, estimando o custo métrico para situações de várias empresas e assim fazer uma relação comparativa. Desta forma, pode-se viabilizar a seleção do projeto mais produtivo economicamente a ser utilizado na operação.

5. Referências

- [1] PEREIRA, B. C. M. **Proposta de uma metodologia para estimativa de geopressões**. 2007. Dissertação (Grau de mestre em Ciências em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- [2] RAHMAN, S. S.; CHILINGARIAN, G. V. **Casing Design Theory and Practice**. Amsterdam: ELSEVIER, 1995.
- [3] SILVA, D. S. **Estudo de geopressões e assentamento de sapatas de revestimento**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2015.
- [4] ZOBACK, M. **Reservoir Geomechanics**. Cambridge University Press. 2007.
- [5] ROCHA, L. A. S.; AZEVEDO, C. T. **Projeto de Poços de Petróleo – Geopressões e Assentamento de Colunas e Revestimentos**, 2ª Edição, Editora Interciência, Rio de Janeiro, Brasil, 2009.
- [6] REYNA, J. C. L.; **Investigação sobre os Métodos de Previsão de Pressão de Poros em Folhelhos e uma Aplicação de uma Abordagem Probabilística**. 2007. Dissertação (Grau de mestre em Engenharia Civil) – PUC, Rio de Janeiro, 2007.