

RELATÓRIO TÉCNICO [REV. 00]

MODELAGEM DE MATERIAL PARTICULADO Poço Niterói

/BM-S-57

Preparado para: ECOLOGY / OGX

Preparado por: Bruna Cerrone

Revisado por: Francisco dos Santos

28 de agosto de 2008

#### PROOCEANO

AV. RIO BRANCO, 311 / 1224 CENTRO CEP 20.0040-009 RIO DE JANEIRO RJ TEL | FAX +55 21 2532-5666 WWW.PROOCEANO.COM.BR



MODELAGEM DE MATERIAL PARTICULADO | BM-S-57

RELATÓRIO TÉCNICO [REV.00]

#### MODELAGEM DE MATERIAL PARTICULADO

Poço Niterói

/BM-S-57

Preparado para: ECOLOGY / OGX

Preparado por: Bruna Cerrone

Revisado por: Francisco dos Santos

28 de agosto de 2008





## SUMÁRIO

| I. INTRODUÇAO   |
|---|
| II. DESCRIÇÃO DA ATIVIDADE4                               |
| III. CARACTERÍSTICAS OCEANOGRÁFICAS DA REGIÃO6            |
| III.1. Corrente8  |
| III.2. Temperatura e Salinidade13                         |
| III.3. Onda15   |
| IV. ESTRATÉGIA DE MODELAGEM15                             |
| IV.1. Modelo Adotado15                                    |
| IV.2. Descrição das Grades16                              |
| IV.4. Construção das Matrizes de Sólidos19                |
| IV.5. Duração dos descartes21                             |
| IV.6. Descartes de Longa Duração23                        |
| V. RESULTADOS   |
| V.1. Pilhas de Deposição – GRADE 124                      |
| V.2. Pilha de Deposição – GRADE 228                       |
| V.3. Plumas de Sólidos em Suspensão (SEM <i>RISER</i> )33 |
| V.4. Plumas de Sólidos em Suspensão (COM <i>RISER)</i>    |
| VI. CONCLUSÕES  |
| VII. BIBLIOGRAFIA45                                       |



#### I. INTRODUÇÃO

Este relatório estuda, através da modelagem numérica, o destino físico do material a ser descartado pela atividade de perfuração do poço Niterói, no Bloco BM-S-57, Bacia de Santos.

#### **II. DESCRIÇÃO DA ATIVIDADE**

O poço em questão situa-se à 24° 10' 41,20" S e 44° 19' 50,60" W sobre a plataforma continental, na região da Bacia de Santos. A lâmina d'água no ponto de operação é de 145 m e este encontra-se distante aproximadamente 94,1 Km da costa, ao sul da cidade de Parati, Rio de Janeiro (Figura 1).



Figura 1: Localização do poço Niterói, BM-S-57 - Bacia de Santos.

A perfuração ocorrerá em cinco seções. Na primeira seção, cujo descarte ocorre a aproximadamente 7 m do fundo (138 m da superfície), será usado um fluido de base água (GEL SWEEPS). Na segunda seção – com descarte também a 7 m do fundo– a composição de fluidos é formada pela mistura do fluido GEL SWEEPS com o fluido PAD MUD, ambos



também de base água. Terminadas estas etapas, o *riser* é instalado e iniciam-se as demais seções com o fluido de base água KCL/KLA-GARD com anti-encerante. Nas seções com *riser* o descarte ocorre a 12 m abaixo da superfície.

Os volumes e vazões descartados em cada seção são apresentados na Tabela 1.

| Tabela 1: Descartes previstos para o poço Niterói no bloco BM-S-57. |         |         |         |         |         |         |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Parâmetros  | unidade | seção 1 | seção 2 | seção 3 | seção 4 | seção 5 |
| profundidade de descarte  | m       | 138,00  | 138,00  | 12,00   | 12,00   | 12,00   |
| volume de cascalho  | m³      | 73,88   | 160,31  | 185,59  | 122,42  | 23,28   |
| volume de fluido aderido  | m³      | 201,40  | 759,45  | 278,39  | 183,63  | 34,92   |
| duração do descarte   | h       | 7,00    | 40,00   | 160,00  | 250,00  | 180,00  |
| volume total descartado   | m³      | 275,28  | 919,75  | 463,98  | 306,05  | 58,20   |
| vazão   | m³/h    | 39,33   | 22,99   | 2,90    | 1,22    | 0,32    |
| base do fluido  | -       | água    | água    | água    | água    | água    |



### III. CARACTERÍSTICAS OCEANOGRÁFICAS DA REGIÃO

A região está sob influência do fluxo da Corrente do Brasil sujeita à passagem de vórtices e meandros da corrente, que juntos ao padrão forçado pelos fenômenos meteorológicos da região caracterizam, de forma resumida, a oceanografia da região.

A escassez de dados oceanográficos disponíveis na costa brasileira torna difícil a tarefa de estabelecer as característica típicas da região para serem utilizadas como forçantes no modelo de dispersão.

Para esta caracterização foram utilizados dados disponíveis do *HYCOM Consortium*. Este projeto é resultado de um esforço multi-institucional criado pelo *National Ocean Partnership Program (NOPP)*, parte do *U. S. Global Ocean Data Assimilation Experiment (GODAE)*, para desenvolver e avaliar a assimilação de dados em um modelo oceânico de coordenadas híbridas.

Os resultados do *hindcast* que contempla a região do poço encontram-se disponíveis para utilização na página do projeto. Os dados possuem uma resolução espacial de 1/12º e uma série temporal de 02 de janeiro de 2003 a 02 de janeiro de 2007 (aproximadamente 1400 dias), e dispõem, dentre outros parâmetros, de temperatura, salinidade e velocidade da corrente. Os resultados obtidos pelo *HYCOM* se ajustam às principais características regionais descritas na literatura, o que valida a sua utilização neste estudo.

As localizações, do poço e do ponto do *HYCOM* utilizado no estudo, podem ser observadas na Figura 2.





Figura 2: Localização do poço e dos dados do HYCOM utilizados.

Os perfis típicos de corrente, temperatura e salinidade utilizados como forçantes na simulação foram obtidos utilizando a técnica de análise de funções ortogonais empíricas (EOF), que é uma poderosa ferramenta no auxilio a compreensão da variabilidade de fenômenos oceanográficos através de séries temporais.

A análise de EOF oferece como resultado uma descrição resumida da variabilidade espacial e temporal do fenômeno, associada a cada modo normal estatístico. Trata-se da decomposição dos dados em modos normais, onde é possível obter a variação temporal associada a cada um destes modos, e também, a quantificação da representatividade de cada modo dentro da variância total dos dados.

Para a obtenção dos perfis típicos usados na modelagem foi conduzida a análise de EOF escalar, considerando assim que as componentes  $u \in v$  são independentes e não correlacionáveis.

**pro**oceano

Os perfis sintéticos construídos são resultado do primeiro modo da EOF, modo este que representa a maior parte da variância. Quanto à variação temporal, optou-se por utilizar a moda deste dado, de forma a representar a situação mais recorrente no tempo.

A Tabela 2 apresenta a variância explicada pelo primeiro modo da EOF, calculada para as componentes u e v da corrente, e para temperatura e salinidade.

| Parâmetro    | Variância (%) |
|--------------|---------------|
| Componente u | 70,00         |
| Componente v | 72,74         |
| Temperatura  | 60,00         |
| Salinidade   | 76,23         |

#### Tabela 2: Variância explicada pelo Primeiro Modo da EOF.

#### **III.1. Corrente**

A série original de dados de corrente utilizada para o cálculo da EOF pode ser observada na Figura 3 em todos os seus níveis. Nota-se algumas inversões que podem ser associadas a fenômenos de mesoescala, como a passagem de vórtices.





## Figura 3: Série temporal de correntes utilizada na análise de EOF para elaboração do perfil sintético de corrente utilizado na modelagem.

Na Figura 4 e Figura 5 são apresentados os perfis sintéticos obtidos pelo primeiro modo da EOF para a componente zonal e para a componente meridional da corrente, respectivamente.







Figura 4: Perfil sintético obtido (preto) a partir das séries temporais (vermelho) para a componente zonal da corrente.







Figura 5: Perfil sintético obtido (preto) a partir das séries temporais dos perfis utilizados (vermelho) para a componente meridional da corrente.

O perfil de correntes obtido pelas componentes zonal e meridional pode ser observado na Figura 6.





Figura 6: Perfil de correntes utilizado para as simulações. Os círculos envolvendo os vetores são proporcionais à velocidade e seus valores (em m/s) podem ser observados na escala de cor ao lado.

Os dados extraídos dos perfis sintéticos podem ser observados na Tabela 3.

| Tabela 3: Comp | Tabela 3: Componente zonal (u) e meridional (v) da corrente, e respectiva<br>intensidade. |                    |                   |  |  |
|----------------|---|--------------------|-------------------|--|--|
| ofundidade (m) | componente u (m/s)  | componente v (m/s) | intensidade (m/s) |  |  |

| profundidade (m) | componente <i>u</i> (m/s) | componente v (m/s) | intensidade (m/s) |
|------------------|---------------------------|--------------------|-------------------|
| 0                | -0,233                    | -0,057             | 0,240             |
| 10               | -0,166                    | -0,077             | 0,183             |
| 20               | -0,166                    | -0,084             | 0,186             |
| 30               | -0,165                    | -0,079             | 0,183             |
| 50               | -0,151                    | -0,071             | 0,167             |
| 75               | -0,124                    | -0,052             | 0,134             |
| 100              | -0,074                    | 0,004              | 0,074             |



#### III.2. Temperatura e Salinidade

Na Figura 7 é apresentado o perfil obtido para a temperatura e na Figura 8 o perfil sintético da salinidade.



Figura 7: Perfil sintético obtido (preto) a partir das séries temporais dos perfis utilizados (vermelho) para a temperatura.





Figura 8: Perfil sintético obtido (preto) a partir das séries temporais dos perfis utilizados (vermelho) para a salinidade.

Os dados extraídos nos perfis sintéticos podem ser observados na Tabela 4.

| profundidade (m) | temperatura (°C) | salinidade |
|------------------|------------------|------------|
| 0.000            | 23.658           | 36.465     |
| 10.000           | 23.421           | 36.533     |
| 20.000           | 23.043           | 36.597     |
| 30.000           | 22.534           | 36.594     |
| 50.000           | 21.865           | 36.536     |
| 75.000           | 20.752           | 36.371     |
| 100.000          | 18.133           | 35.938     |

Tabela 4: Dados de temperatura e salinidade com a profundidade.



#### III.3. Onda

Segundo Melo Filho (1991), o litoral brasileiro pode ser dividido, quanto ao clima de ondas, em 2 regiões. A região que vai do litoral sul até Cabo Frio é caraterizado pelo domínio de ondulações com períodos relativamente longos, diferente do encontrado acima de Cabo Frio, onde o clima é dominado por ondas com períodos mais curtos. Desta forma, os resultados encontrados por Violante-Carvalho (1998), na Bacia de Campos, podem ser utilizados para o estudo em questão. Segundo o autor, de todas as situações encontradas a mais comum, com ocorrência de 25,07% durante o período considerado, é um mar em desenvolvimento de Norte/Norte-Nordeste com ondulação de Sul/Sudeste. Na Tabela 5 são apresentados os valores utilizados nas simulações.

Tabela 5: Altura significativa e período de pico utilizado.

| Altura significativa (m) | Período (s) |
|--------------------------|-------------|
| 1,0                      | 5,0         |

#### **IV. ESTRATÉGIA DE MODELAGEM**

#### IV.1. Modelo Adotado

O modelo escolhido para este trabalho é conhecido pelo nome OOC (*Offshore Operators Committee*) e foi desenvolvido especialmente para simulações de descarte de efluentes de plataformas de petróleo.

O modelo OOC simula o comportamento de uma pluma de efluente desde o momento de descarte até um instante e distância determinados pelo usuário. Para tanto, o modelo trabalha em três módulos distintos, encarregados, cada um, de uma diferente fase da pluma.

O primeiro módulo cuida da diluição inicial da pluma, representada em um modelo integral. Este módulo acompanha a evolução do efluente do momento que deixa a fonte até que encontre uma superfície horizontal (fundo ou superfície do mar) ou até que se estabilize no nível de flutuação neutra. Esta fase, também conhecida como *fase de jato*, ocorre enquanto o efluente possui movimento próprio, dado pela diferença de densidade com o meio ou pela velocidade de saída da fonte.

Finda a primeira etapa, o efluente se espalhará na profundidade em que se estabilizou devido ainda à diferença de densidade com o meio. Esta diferença tende a diminuir com o tempo e, em dado momento, sua contribuição para o espalhamento do efluente será inferior àquela dada pela turbulência do ambiente. Neste momento tem início



a última fase, de dispersão passiva, onde o efluente, a não ser pela velocidade vertical associada a cada constituinte particulado, não possui movimento próprio e segue apenas a dinâmica local. O OOC aplica a dispersão passiva separadamente para cada constituinte do efluente.

Com o OOC, é possível obter resultados para a concentração de sólidos suspensos e a espessura dos acúmulos de fundo formados pela decantação do material. Estes resultados são gerados pelo modelo em grades cuja resolução é determinada pelo usuário no início da simulação.

Uma descrição detalhada do modelo é encontrada em Brandsma & Smith (1999).

#### IV.2. Descrição das Grades

Os efeitos dos descartes de sólidos no mar variam consideravelmente de acordo com a distância vertical entre a fonte e o assoalho marinho. Nas seções onde o descarte é feito próximo ao fundo (sem utilização do *riser*), o material tende a formar uma pilha de deposição significativamente maior que àquela associada aos descartes ocorrentes junto à superfície. Por outro lado, o material descartado da superfície (com *riser*) irá percorrer uma grande distância sofrendo influência das forçantes locais e cobrindo uma área maior quando depositado.

Em estudos de modelagem, a relação entre a resolução da grade projetada e a escala do fenômeno estudado é vital na obtenção de bons resultados. Deve-se atentar para o fato de que uma grade ampla, que abranja toda a região de deposição pode não ter resolução suficiente para mapear com exatidão a região de maior espessura. Da mesma forma, uma grade de alta resolução pode não cobrir uma área suficientemente grande como a que se espera para a deposição do material.

É proposto, como solução neste trabalho, o uso de duas diferentes grades. A primeira (grade 1), voltada para a estimativa da área total de deposição possui um espaçamento de 6,25 m e uma área de 375000 m<sup>2</sup> (~0,4 km<sup>2</sup>). A segunda (grade 2), projetada para a região de maior acúmulo de sedimentos, possui uma resolução espacial de 1,63 m e cobre uma área de 25000 m<sup>2</sup> (0,03 km<sup>2</sup>).

A comparação das duas grades projetadas e seus pontos de lançamento pode ser observada na Figura 9.





## Figura 9: Comparação entre as duas grades projetadas para o estudo. A marcação em laranja representa a posição do ponto de lançamento em cada grade.

#### IV.3. Descrição dos Descartes

No modelo OOC são necessários os seguintes parâmetros:

vazão;

raio da fonte;

profundidade de descarte;

inclinação vertical;

direção;

duração do descarte;

densidade dos componentes sólidos;

densidade do efluente.

A densidade do efluente nos descartes de cascalho e fluido aderido é calculada por uma média ponderada entre os volumes V e densidades p.

 $\rho_{efluente} = \rho_{fluido} \left( \frac{V_{fluido}}{V_{fluido} + V_{cascalho}} \right) + \rho_{cascalho} \left( \frac{V_{cascalho}}{V_{fluido} + V_{cascalho}} \right)$ 

Utilizando a seção 1 como exemplo, consideramos V<sub>fluido</sub>=201,4 m<sup>3</sup>, V<sub>cascalho</sub>=73,88 m<sup>3</sup>,  $\rho_{fluido}$ =1054,52 Kg/m<sup>3</sup>,  $\rho_{cascalho}$ =2200 Kg/m<sup>3</sup>. Considerando a equação acima, chega-se



\_ . . . . .

a uma densidade do efluente  $\rho_{efluente}$ =1361,94 Kg/m<sup>3</sup> para a descarga de cascalhos e fluido aderido.

Os valores obtidos para todos os descartes de cascalho e fluido aderido podem ser observados na Tabela 6.

| Tabela 6: Valores usados na descrição da densidade média dos efluentes |         |         |         |         |         |         |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Parâmetro  | Unidade | seção 1 | seção 2 | seção 3 | seção 4 | seção 5 |
| V <sub>total</sub>   | m³      | 275,28  | 919,75  | 463,98  | 306,05  | 58,20   |
| V <sub>cascalho</sub>  | m³      | 73,88   | 160,31  | 185,59  | 122,42  | 23,28   |
| V <sub>fluido</sub>  | m³      | 201,4   | 759,4   | 278,4   | 183,6   | 34,9    |
| f <sub>cascalho</sub>  | %       | 26,84%  | 17,43%  | 40,00%  | 40,00%  | 40,00%  |
| f <sub>fluido</sub>  | %       | 73,16%  | 82,57%  | 60,00%  | 60,00%  | 60,00%  |
| $\rho_{casc}$  | kg/m³   | 2200    | 2200    | 2400    | 2500    | 2600    |
| ρ <sub>fluido</sub>  | kg/m³   | 1054,52 | 1085,48 | 1138,41 | 1258,24 | 1557,82 |
| Pefluente  | kg/m³   | 1361,94 | 1279,73 | 1643,04 | 1754,94 | 1974,69 |

O modelo OOC é mais bem adaptado à representação de descartes de curta duração. Entretanto, para o cálculo das pilhas de deposição no assoalho marinho, é possível representar descartes de longa duração através de um fator de escala aplicado a um descarte curto.

Ao utilizar-se um perfil estacionário de correntes (que não varia no tempo) e uma vazão constante considera-se que partículas idênticas lançadas nos primeiros e últimos instantes do descarte terão o mesmo comportamento ao longo da coluna d'água. Logo, irão depositar-se na mesma posição.

Assim sendo, é plausível considerar que um descarte de 6 horas formará exatamente a mesma pilha que 6 descartes de 1 hora. Ou seja, é possível representar um descarte de longa duração através de um fator de escala:

t  $\gamma = \frac{1}{t_{simulado}}$ 

Onde t é o tempo esperado na operação e  $t_{simulado}$  a duração do descarte usada nas simulações. Como as simulações foram efetuadas com 1 hora de descarte o fator de escala é igual ao tempo apresentado na Tabela 1.

Além destes parâmetros, é necessário que se conheça o comportamento das partículas sólidas lançadas em cada descarte. Em virtude das incertezas a respeito do material resultante da perfuração de um poço exploratório, optou-se por usar uma



distribuição genérica de velocidades de queda baseadas em Brandsma e Smith (1999). Esta distribuição foi obtida a partir de uma quantidade representativa de experimentos e é aconselhada no manual do modelo para quando os dados locais são desconhecidos (Tabela 7).

| Classe | Fração do volume | velocidade de queda (m/s) |  |  |  |  |  |
|--------|------------------|---------------------------|--|--|--|--|--|
| 1      | 0,25             | 0,259751                  |  |  |  |  |  |
| 2      | 0,15             | 0,135179                  |  |  |  |  |  |
| 3      | 0,16             | 0,097963                  |  |  |  |  |  |
| 4      | 0,18             | 0,040112                  |  |  |  |  |  |
| 5      | 0,02             | 0,014472                  |  |  |  |  |  |
| 6      | 0,03             | 0,002328                  |  |  |  |  |  |
| 7      | 0,07             | 0,000218                  |  |  |  |  |  |
| 8      | 0,06             | 0,000017                  |  |  |  |  |  |
| 9      | 0,08             | 0,00001                   |  |  |  |  |  |

Tabela 7: Densidade, fração de volume e velocidade de queda para os descartes de cascalhos e sólidos de fluido de base aquosa.

Esta distribuição foi estimada a partir da análise granulométrica do material. Este tipo de estimativa subestima a velocidade de queda dos menores grãos uma vez que não contempla o agrupamento destes em partículas maiores e, por conseqüência, com maiores velocidades de queda. Para corrigir este efeito, usa-se no modelo um coeficiente de ajuste, cujo valor indicado no manual (Brandsma & Smith, 1999) para estas ocasiões é de 28.

#### IV.4. Construção das Matrizes de Sólidos.

Primeiramente é necessário estimar a fração de sólidos presente em cada descarte. Nos descartes de cascalho e fluido aderido, esta fração é dada pela soma das contribuições do cascalho ( $f_{casc}$ ) e dos sólidos presentes no fluido ( $f_{solflu}$ ).

#### $f_{soltot} = f_{casc} + f_{solflu}$

A fração de cascalhos e de sólidos do fluido é extraída diretamente da relação entre o volume de sólidos e o volume total de cada descarte.

Apesar de apresentar uma densidade média nos dados teóricos, o modelo OOC permite que seja atribuída uma densidade específica para cada classe de velocidade de queda descrita. Entretanto, pela falta de conhecimento do material descartado, optou-se por trabalhar com um valor médio de densidade para os sólidos descartados, que são fornecidos pela empresa fabricante do fluido.



Assim, a fração de cada classe de velocidade de queda foi recalculada para adaptarse aos descartes a serem realizados através da equação:

 $f_{OOC} = f_{Brandsma} \& Smith \times f_{estimado}$ 

As matrizes calculadas para cada descarte são apresentadas da Tabela 8 a Tabela 12.

| Tabela 8: I | Matriz de | densidade, | fração | e velocidade | de queda | para a | seção | <b>1</b> . |
|-------------|-----------|------------|--------|--------------|----------|--------|-------|------------|
|             |           |            |        |              | 1        |        |       |            |

| sólido | dens (g/cm³) | f <sub>ooc</sub> | vel queda (pés/s) |
|--------|--------------|------------------|-------------------|
| sol1   | 2,2349       | 0,073602         | 0,8522000         |
| sol2   | 2,2349       | 0,044161         | 0,4435000         |
| sol3   | 2,2349       | 0,047105         | 0,3214000         |
| sol4   | 2,2349       | 0,052993         | 0,1316000         |
| sol5   | 2,2349       | 0,005888         | 0,0474800         |
| sol6   | 2,2349       | 0,008832         | 0,0076380         |
| sol7   | 2,2349       | 0,020608         | 0,0007160         |
| sol8   | 2,2349       | 0,017664         | 0,0000553         |
| sol9   | 2,2349       | 0,023553         | 0,000044          |

#### Tabela 9: Matriz de densidade, fração e velocidade de queda para a seção 2.

| sólido | dens (g/cm³) | f <sub>ooc</sub> | vel queda (pés/s) |
|--------|--------------|------------------|-------------------|
| sol1   | 2,2900       | 0,053782         | 0,8522000         |
| sol2   | 2,2900       | 0,032269         | 0,4435000         |
| sol3   | 2,2900       | 0,034421         | 0,3214000         |
| sol4   | 2,2900       | 0,038723         | 0,1316000         |
| sol5   | 2,2900       | 0,004303         | 0,0474800         |
| sol6   | 2,2900       | 0,006454         | 0,0076380         |
| sol7   | 2,2900       | 0,015059         | 0,0007160         |
| sol8   | 2,2900       | 0,012908         | 0,0000553         |
| sol9   | 2,2900       | 0,017210         | 0,000044          |

#### Tabela 10: Matriz de densidade, fração e velocidade de queda para a seção 3.

| sólido | dens (g/cm³) | fooc     | vel queda (pés/s) |
|--------|--------------|----------|-------------------|
| sol1   | 2,3722       | 0,115256 | 0,8522000         |
| sol2   | 2,3722       | 0,069153 | 0,4435000         |
| sol3   | 2,3722       | 0,073764 | 0,3214000         |
| sol4   | 2,3722       | 0,082984 | 0,1316000         |
| sol5   | 2,3722       | 0,009220 | 0,0474800         |
| sol6   | 2,3722       | 0,013831 | 0,0076380         |
| sol7   | 2,3722       | 0,032272 | 0,0007160         |
| sol8   | 2,3722       | 0,027661 | 0,0000553         |
| sol9   | 2,3722       | 0,036882 | 0,000044          |



| *** | Figure 4 | c defisidade, fração e | velocidade (     | ie queda para a seguo |
|-----|----------|------------------------|------------------|-----------------------|
|     | sólido   | dens (g/cm³)           | f <sub>ooc</sub> | vel queda (pés/s)     |
|     | sol1     | 2,5050                 | 0,123185         | 0,8522000             |
|     | sol2     | 2,5050                 | 0,073911         | 0,4435000             |
|     | sol3     | 2,5050                 | 0,078839         | 0,3214000             |
|     | sol4     | 2,5050                 | 0,088693         | 0,1316000             |
|     | sol5     | 2,5050                 | 0,009855         | 0,0474800             |
|     | sol6     | 2,5050                 | 0,014782         | 0,0076380             |
|     | sol7     | 2,5050                 | 0,034492         | 0,0007160             |
|     | sol8     | 2,5050                 | 0,029564         | 0,0000553             |
|     | sol9     | 2,5050                 | 0,039419         | 0,0000044             |

#### Tabela 11: Matriz de densidade, fração e velocidade de queda para a seção 4.

#### Tabela 12: Matriz de densidade, fração e velocidade de queda para a seção 5.

|        | , ,          |          | <u> </u>          |
|--------|--------------|----------|-------------------|
| sólido | dens (g/cm³) | fOOC     | vel queda (pés/s) |
| sol1   | 2,7293       | 0,138311 | 0,8522000         |
| sol2   | 2,7293       | 0,082987 | 0,4435000         |
| sol3   | 2,7293       | 0,088519 | 0,3214000         |
| sol4   | 2,7293       | 0,099584 | 0,1316000         |
| sol5   | 2,7293       | 0,011065 | 0,0474800         |
| sol6   | 2,7293       | 0,016597 | 0,0076380         |
| sol7   | 2,7293       | 0,038727 | 0,0007160         |
| sol8   | 2,7293       | 0,033195 | 0,0000553         |
| sol9   | 2,7293       | 0,044260 | 0,000044          |

#### IV.5. Duração dos descartes

Conhecendo a profundidade que o efluente será descartado e a velocidade de queda de cada partícula, é possível avaliar o tempo de chegada das partículas ao assoalho oceânico, simplesmente pela divisão da camada a ser percorrida e a velocidade de queda de cada classe de grão. De acordo com os parâmetros apresentados na Tabela 1, os tempos obtidos para cada descarte são apresentados na Tabela 13.

#### tempo (horas) Classe seção 3 – seção 4 – seção 5 seção 1 – seção 2 1 0,007 0,14 2 0,014 0,27 3 0,020 0,38 4 0,048 0,92 5 0,134 2,55 15,87 6 0,835 7 8,910 169,29 8 115,360 2191,84 9 1440,048 27360,91

#### Tabela 13: Tempos estimados para cada classe de sólido nos descartes previstos.

**pro**oceano



A representação gráfica dos tempos de queda estimados, para cada classe de grão com seu respectivo volume percentual, pode ser observada na Figura 10.

# Figura 10: Tempo de queda das partículas de acordo com a classe granulométrica de cada tipo de descarte. Os círculos preenchidos representam a fração de volume que cada classe representa.

Nota-se nos descartes das seções sem *riser* (seção 1 e seção 2) que 86% do volume de sólidos depositam-se em menos de 10 h. Esta percentagem é de 79 % para os descartes com riser, uma vez que a distância a ser percorrida entre o ponto de descarte e o assoalho marinho é maior.

Quanto maior for o tempo de permanência dos grãos na coluna d'água, maior é a dispersão que as partículas sofrem em função da corrente. E quanto mais dispersa, maior é a área coberta pelas partículas e menores são as espessuras por elas formadas.

Uma maneira de estimar se as frações de volume que depositam-se após um determinado tempo formarão uma espessura maior que o limiar admitido é calculando o deslocamento horizontal que a partícula sofre em função do perfil de corrente. Para isto, foi realizada um aproximação de primeira ordem, ou seja, descartando os efeitos não-lineares do efluente no meio. Desta forma é possível estimar o quão espaçados as partículas se encontram, permitindo a escolha do tempo de simulação apropriada (Tabela 14).



| Classe | distância horizontal (km) |                             |  |  |
|--------|---------------------------|-----------------------------|--|--|
| Classe | seção 1 – seção 2         | seção 3 – seção 4 – seção 5 |  |  |
| 1      | 0,004                     | 0,08                        |  |  |
| 2      | 0,008                     | 0,15                        |  |  |
| 3      | 0,011                     | 0,21                        |  |  |
| 4      | 0,027                     | 0,52                        |  |  |
| 5      | 0,076                     | 1,44                        |  |  |
| 6      | 0,471                     | 8,95                        |  |  |
| 7      | 5,028                     | 95,52                       |  |  |
| 8      | 65,095                    | 1236,80                     |  |  |
| 9      | 812,583                   | 15439,08                    |  |  |

|  | i norizontal percorrida por para cada classe de solido. |
|--|---|
|--|---|

#### IV.6. Descartes de Longa Duração

A partir de um determinado momento, durante a emissão do efluente, o nível de concentração de sólidos em suspensão atinge um estado quase-estacionário, a certa distância da fonte. Assim, mesmo que o tempo de descarte dure mais que o tempo necessário para a pluma atingir este estado, os níveis de concentração não mudarão ao longo do tempo nesta região, até o fim da emissão.

O método prosposto por Brandsma e Smith (1999) foi utilizado para estimar o momento em que a pluma entra em condição estacionária ( $t_{inicial}$ ) e o momento em que a pluma deixa essa condição, a uma determinada distância da fonte ( $t_{final}$ ):

$$t_{inicial} = \frac{X + 4\sigma}{u}$$
  $e$   $t_{final} = \frac{X - 4\sigma}{u} + t_{simulado}$ 

onde  $\sigma = \sigma_0 \left[ 1 + 4^{4/3} \frac{2}{3} \left( \frac{A_L \Delta t}{\sigma_0^{2/3}} \right) \right]$ , X é a distância da fonte, u velocidade média da corrente

local,  $A_L$  um parâmetro de dissipação e  $\sigma_0$  tamanho inicial da pluma, estimado na ordem de grandeza do tubo de descarte.



#### **V. RESULTADOS**

A seguir serão apresentadas as pilhas de deposição no assoalho marinho e plumas de sólidos em suspensão na coluna d'água estimadas pelas simulações realizadas.

As pilhas de deposição serão apresentadas por descarte e integradas, visando considerar o efeito conjunto dos descartes.

Por ocorrerem de forma sequencial e possuírem uma curta expectativa de permanência na coluna d'água, não será apresentada integração para as plumas de sólidos em suspensão.

As plumas são representadas aqui por perfis radiais ao poço (situado no ponto [0,0]), extraídos de forma a identificar a região de maior concentração de sólidos em suspensão.

De acordo com as análises realizadas em função da velocidade de queda e estimativa da distância percorrida por cada classe granulométrica (conforme apresentado na Figura 10 e Tabela 14), os tempos escolhidos para cada simulação foram:

10 h - seções sem riser;

24 h -seções com riser;

#### V.1. Pilhas de Deposição – GRADE 1

As pilhas formadas em cada descarte podem ser observadas da Figura 11 (seção 1) a Figura 15 (seção 5) e a integração dos resultados na Figura 16.







Figura 11: Espessura de deposição (m) encontrada para o descarte da seção 1, com a grade 1.



Figura 12: Espessura de deposição (m) encontrada para o descarte da seção 2, com a grade 1.







Figura 13: Espessura de deposição (m) encontrada para o descarte da seção 3, com a grade 1.



Figura 14: Espessura de deposição (m) encontrada para o descarte da seção 4, com a grade 1.







Figura 15: Espessura de deposição (m) encontrada para o descarte da seção 5, com a grade 1.



Figura 16: Pilha resultante da integração de todos os descartes realizados com a grade 1.



Um resumo dos resultados obtidos para a deposição de sólidos é apresentado na Tabela 15.

| simulação        | esp. máxima (m) | área (m²) |
|------------------|-----------------|-----------|
| seção 1          | 0,413           | 8028,38   |
| seção 2          | 1,100           | 11172,03  |
| seção 3          | 0,142           | 34241,52  |
| seção 4          | 0,113           | 26715,91  |
| seção 5          | 0,024           | 9034,22   |
| INTEGRAÇÃO TOTAL | 1,513           | 54700,80  |

Tabela 15: Resumo dos resultados obtidos para as pilhas de deposição.

Observa-se que o descarte responsável pela maior espessura é o da seção 2 (1,1 m). O descarte da seção 3 forma a maior área (34241,52 m<sup>2</sup>) e contempla 63% da cobertura obtida pela integração de todas as pilhas.

#### V.2. Pilha de Deposição – GRADE 2

As maiores espessuras podem ser subestimadas pela utilização de grandes espaçamentos de grade. De forma a evitar este efeito, um novo grupo de simulações foi realizado, usando-se desta vez uma grade cuja resolução espacial é superior à da *Grade 1*. Espera-se, desta forma, uma correta estimativa das espessuras máximas formadas nestes descartes.

As pilhas de deposição dos descartes que foram obtidas com a grade 2 são apresentadas da Figura 17 (seção 1) a Figura 21 (seção 5).







Figura 17: Espessura de deposição (m) encontrada para o descarte da seção 1, com a grade 2.



Figura 18: Espessura de deposição (m) encontrada para o descarte da seção 1, com a grade 2.







Figura 19: Espessura de deposição (m) encontrada para o descarte da seção 1, com a grade 2.



Figura 20: Espessura de deposição (m) encontrada para o descarte da seção 1, com a grade 2.







Figura 21: Espessura de deposição (m) encontrada para o descarte da seção 5, com a grade 2.

A integração das pilhas de deposição obtidas com a grade 2 é apresentada na Figura 22. A espessura máxima alcançada é de aproximadamente 2,07 m a 10 m de distância da fonte.







Figura 22: Pilha resultante da integração de todos os descartes realizados com a grade 2.

As espessuras máximas encontradas com a grade 2, para cada seção, são apresentadas na Tabela 16. Conforme esperado, a maior contribuição é devida ao descarte da seção 2.

| simulação        | esp. máxima (m) |
|------------------|-----------------|
| seção 1          | 0,724           |
| seção 2          | 1,982           |
| seção 3          | 0,160           |
| seção 4          | 0,160           |
| seção 5          | 0,033           |
| INTEGRAÇÃO TOTAL | 2,706           |

#### Tabela 16: Espessuras máximas obtidas com a grade 2.



#### V.3. Plumas de Sólidos em Suspensão (SEM RISER)

Os resultados das plumas de sólidos em suspensão serão apresentados apenas individualmente uma vez que o impacto por elas causado não é cumulativo.

As plumas são representadas aqui por perfis radiais ao poço (situado no ponto [0,0]) extraídos de forma a identificar a região de maior concentração de sólidos em suspensão.

O posicionamento das radiais para o descarte da seção 1 pode ser observado na Figura 23, enquanto o resultado de concentração de sólidos obtido é apresentado na Figura 24. Pode-se observar que a pluma a 10 m de distância da fonte ocupa os últimos 40 m da coluna dágua. Conforme afasta-se da fonte, a pluma perde altura e apresenta um maior espalhamento lateral.



Figura 23: Posicionamento das radiais de concentração de sólidos em suspensão decorrente do descarte da seção 1.







## Figura 24: Perfis radiais de concentração de sólidos em suspensão decorrente do descarte da seção 1.

As radiais de concentração do descarte de cascalho e fluido aderido na seção 2 e os perfis extraídos são apresentados na Figura 25 e na Figura 26, respectivamente.

A pluma decorrente deste descarte apresenta uma ocupação menor na coluna dágua em relação ao descarte anterior. Os valores de concentração máxima obtidos em cada radial também são inferiores. Com 100 m de distância da fonte, a pluma já encontra-se abaixo de 5 ppm.





Figura 25: Posicionamento das radiais de concentração de sólidos em suspensão decorrente do descarte da seção 2.





Figura 26: Perfis radiais de concentração de sólidos em suspensão decorrente do descarte da seção 2.

#### V.4. Plumas de Sólidos em Suspensão (COM RISER)

O posicionamento da radiais escolhidas para estudar o descarte da seção 3 é apresentado na Figura 27 enquanto os perfis de concentração nelas obtidos são apresentados na Figura 28. A 10 m de distância da fonte, a pluma se restringe aos primeiros metros da coluna d'água com uma concetração máxima de 341,2 ppm. A partir dos 50 m, a pluma passa a ocupar quase toda a coluna d'água porém, com um forte decaimento da concentração inicial. A 300 m da fonte, a concentração máxima estimada é inferior a 5 ppm.





Figura 27: Posicionamento das radiais de concentração de sólidos em suspensão decorrente do descarte da seção 3.





Figura 28: Perfis radiais de concentração de sólidos em suspensão decorrente do descarte da seção 3.

As radiais do descarte da seção 4 podem ser observadas na Figura 29 e os respectivos perfis de concentração, na Figura 30. Neste descarte, a pluma apresenta as maiores concentrações na região próxima a fonte (411,5 ppm). No entanto, a 200 m, os valores encontrados já são inferiores a 5 ppm.







Figura 29: Posicionamento das radiais de concentração de sólidos em suspensão decorrente do descarte da seção 4.







## Figura 30: Perfis radiais de concentração de sólidos em suspensão decorrente do descarte da seção 4.

As radiais extraídas no descarte da seção 5 podem ser observadas na Figura 31 e os perfis de concentração correspondentes na Figura 32. A pluma formada neste descarte apresenta concentrações menores do que a apresentada nos descartes das seções 4 e 5. A 100 m de distância da fonte a pluma apresenta concentrações próximas a 2 ppm.





Figura 31: Posicionamento da radial de concentração de sólidos em suspensão decorrente do descarte da seção 5.





Figura 32: Perfil radial de concentração de sólidos em suspensão decorrente do descarte da seção 5.

As concentrações máximas obtidas em cada radial para todas as plumas formadas são apresentadas na Tabela 17.

| distância da fonte (m) | seção 1 | seção 2 | seção 3 | seção 4 | seção 5 |
|------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 10                     | 53,1    | 30,8    | 341,2   | 411,5   | 127,1   |
| 50                     | 10,6    | 6,3     | 43,4    | 34,4    | 7,3     |
| 100                    | 5,7     | 3,2     | 17,5    | 9,7     | 1,9     |
| 200                    | 2,3     |         | 7,9     | 2,5     |         |
| 300                    |         |         | 4,9     |         |         |

Tabela 17: Concentração máxima (ppm) de sólidos em suspensão em cada radial para os descartes efetuados.

O descarte em que a pluma alcança a maior distância da fonte com o maior valor de concentração máxima corresponde à seção 3. Sabe-se que, quanto mais distante da fonte, maior é o tempo que a pluma leva para atingir a condição de estacionariedade.

Um parâmetro importante a se conhecer é o tempo após o término do vazamento em que a concentração volta a diminuir. Utilizando as equações para o cálculo do início e fim da condição estacionária e conhecendo agora a maior distância de interesse, pode-se calcular que:

$$T_{\text{início}} = \frac{300 + 2,62}{0,16} \sim 0,53 \,\text{h}$$

$$T_{fim} = \frac{300 - 2,62}{0,16} + T_{simulado} \sim T_{simulado} + 0,52 h$$

Ou seja, a pluma atinje sua distância máxima acima do limiar com 0,53 h após o início do descarte. Com aproximadamente 0,52 h (31 minutos) após término do descarte a concentração volta a decrescer.



#### **VI. CONCLUSÕES**

Cinco simulações numéricas foram realizadas para determinar o comportamento do material a ser descartado no mar pela atividade de perfuração do poço Niterói no bloco BM-S-57, na Bacia de Santos.

Foram feitas estimativas tanto para o número de sólidos em suspensão na coluna d'água, quanto para o acúmulo destes no leito marinho. Os acúmulos no leito marinho foram calculados em duas diferentes grades, de forma a melhor avaliar tanto a região de maior espessura (grade 2) quanto a área total da deposição (grade 1).

O cenário ambiental utilizado nas modelagens procurou reproduzir as principais características oceanográficas da região do bloco. O acúmulo do material tanto das seções sem *riser* quanto das seções com *riser* se deram sentido oeste. Os resultados apresentados, concordaram com a hidrodinâmica estimada para a região.

A espessura máxima obtida, calculada pela grade 2, foi de 2,07 m e a área coberta pela pilha, estimada com a grade 1, abrange 54700,80m<sup>2</sup>. O descarte que mais contribuiu para a espessura resultante foi da seção 2 e, para a área, da seção 3.

Quanto às plumas de sólidos em suspensão, a maior distância foi estimada para o descarte da seção 3. A pluma manteve concentrações acima de 4 ppm até cerca de 300 m da fonte. Verificou-se que são necessários aproximadamente 31 minutos, após o término do descarte, para que a concentração a esta distância da fonte volte a diminuir.



#### **VII. BIBLIOGRAFIA**

**Brandsma, M., & Smith, J., 1999**. Offshore Operators Committee Mud and Produced Water Discharge Model Report and User Guide. *ExxonMobil Upstream Research Co.* 

**Melo Filho, E.,1982.** Investigação sobre a Análise da Agitação Marítima. Tese de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

**Vilolante-Carvalho, N., 1998.** Investigação sobre a Evolução do Clima de Ondas na Bacia de Campos e a Correlação com as Situações Meteorológicas Associadas. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 186p.