



RELATÓRIO TÉCNICO [REV. 00]

**MODELAGEM DE MATERIAL PARTICULADO
BM-ES-37**

/BM-ES-37 – Poço 416 A EX

Preparado para:
Perenco Oil and Gas

Preparado por:
Natalia Gomes

Revisado por:
Bruna Cerrone

03 de novembro de 2009

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

RELATÓRIO TÉCNICO [REV.00]

MODELAGEM DE MATERIAL PARTICULADO

/BM-ES-37| Poço 416 A EX

Preparado para:
Perenco Oil and Gas

Preparado por:
Natalia Gomes

Revisado por:
Bruna Cerrone

03 de novembro de 2009

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| I. INTRODUÇÃO..... | 4 |
| II. DESCRIÇÃO DA ATIVIDADE..... | 4 |
| III. CARACTERÍSTICAS OCEANOGRÁFICAS DA REGIÃO | 6 |
| III.1. Corrente, Temperatura e Salinidade. | 6 |
| III.2. Onda..... | 11 |
| IV. ESTRATÉGIA DE MODELAGEM | 12 |
| IV.1. Modelo Adotado..... | 12 |
| IV.2. Descrição das Grades | 12 |
| IV.4. Construção das Matrizes de Sólidos..... | 16 |
| IV.5. Tempo de Descarte..... | 18 |
| <i>IV.5.1. Pilhas de Deposição.....</i> | <i>19</i> |
| <i>IV.5.2. Plumas de Sólidos em Suspensão.....</i> | <i>21</i> |
| V. RESULTADOS..... | 23 |
| V.1. Pilhas de Deposição..... | 23 |
| <i>V.1.1. Grade 1</i> | <i>23</i> |
| <i>V.1.2. Grade 2.....</i> | <i>29</i> |
| V.2. Plumas de Sólidos em Suspensão | 33 |
| VI. CONCLUSÕES..... | 33 |
| VII. BIBLIOGRAFIA..... | 33 |

I. INTRODUÇÃO

Este relatório estuda, através da modelagem numérica, o destino físico do material a ser descartado pela atividade de perfuração do projeto de poço 416 A EX, no Bloco BM-ES-37, Bacia do Espírito Santo. O modelo e método usados visam atender aos requisitos da Coordenadoria Geral de Petróleo e Gás (CGPEG/IBAMA) para a atividade em questão.

II. DESCRIÇÃO DA ATIVIDADE

O poço em questão situa-se à $19^{\circ} 39' 24''$ S e $38^{\circ} 47' 30''$ W, sobre a elevação continental a aproximadamente 138 Km da cidade de Linhares, no Espírito Santo. A lâmina d'água no ponto de operação é de 900 m (Figura 1).

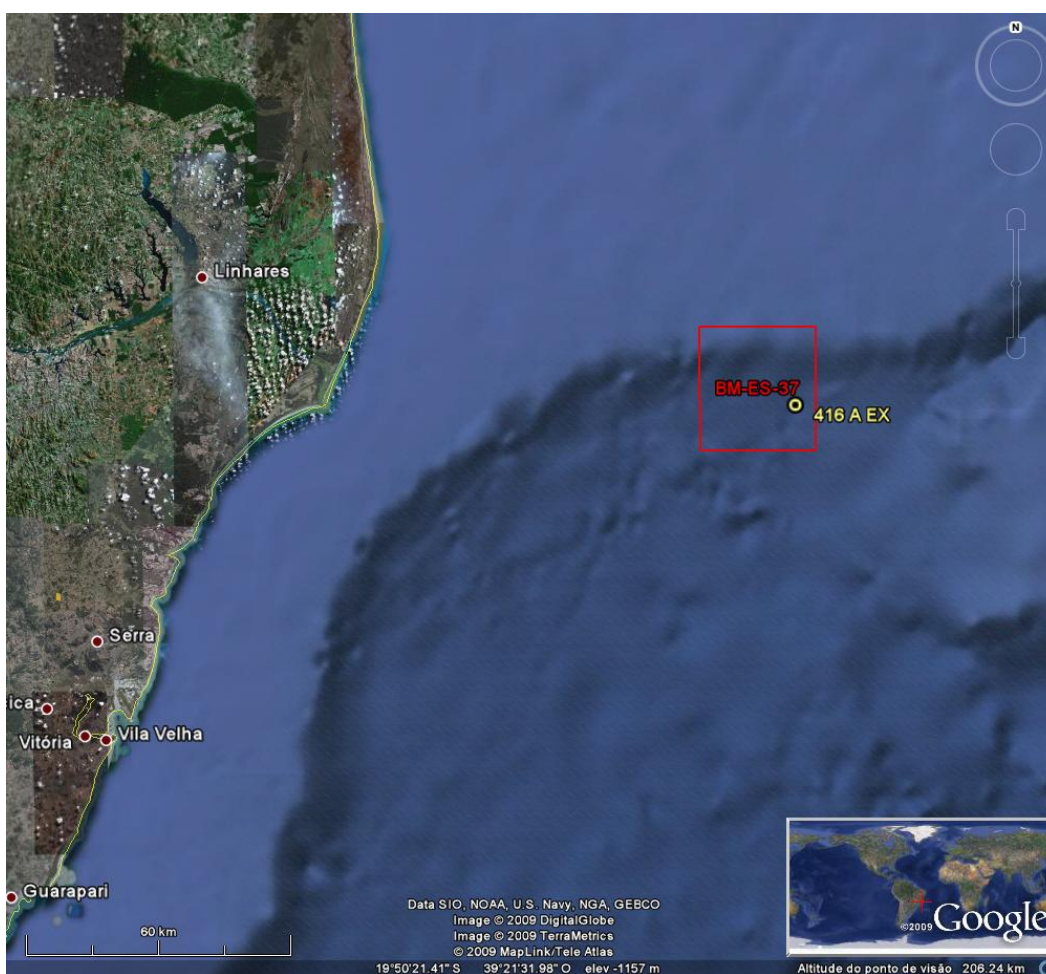


Figura 1: Localização do poço no bloco BM-ES-37 - Bacia do Espírito Santo

A perfuração ocorrerá em quatro seções. Nas duas primeira **seção**, onde o descarte ocorrerá a aproximadamente 7 m do fundo (cerca de 893 m da superfície), será utilizado um fluido de base água. Terminada essa etapa, o *riser* é instalado e o descarte passa a ser a 10 m abaixo da superfície, também com a utilização de um fluido de base aquosa.

Dois tipos de descarte serão realizados durante a atividade. O primeiro é composto pela mistura do cascalho produzido durante a perfuração com a parcela de fluido de perfuração que permanece aderida ao cascalho após a passagem pelo sistema de tratamento. O segundo tipo ocorre ao término das seções onde há um volume de fluido excedente a ser descartado.

Na operação em questão é previsto o segundo tipo de descarte (fluido excedente) somente na última seção.

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

Tabela 1: Descartes previstos para a atividade no bloco BM-ES-37.

| Parâmetros | unidade | seção 1 | seção 2 | seção 3 | seção 4 |
|---|-------------------|---------|---------|---------|---------|
| diâmetro da seção | pol, | 36" | 26" | 17" 1/2 | 12" 1/4 |
| profundidade de descarte | m | 893,00 | 893,00 | 10,00 | 10,00 |
| orientação vertical do tubo de descarga | ° | -90,00 | -90,00 | 90,00 | 90,00 |
| cascalho e fluido aderido | | | | | |
| volume de cascalho | m ³ | 31,52 | 264,44 | 446,92 | 404,52 |
| volume de fluido aderido | m ³ | 208,00 | 965,00 | 113,00 | 102,00 |
| duração do descarte | h | 18,70 | 96,00 | 336,00 | 648,00 |
| volume total descartado | m ³ | 239,52 | 1229,44 | 559,92 | 506,52 |
| vazão | m ³ /h | 12,81 | 12,81 | 1,67 | 0,78 |
| base do fluido | - | água | água | água | água |
| fluido excedente | | | | | |
| volume do fluido | m ³ | - | - | - | 1061,00 |
| duração do descarte | h | - | - | - | 720,00 |
| vazão | m ³ /h | - | - | - | 1,47 |

III. CARACTERÍSTICAS OCEANOGRÁFICAS DA REGIÃO

III.1. Corrente, Temperatura e Salinidade.

Neste estudo, os dados de temperatura, salinidade e corrente são resultantes de um experimento de longo termo com o modelo *HYCOM* (Hybrid Coordinate Model).

O *HYCOM* é um modelo de circulação oceânica global que utiliza discretização horizontal em diferenças finitas (GABIOUX, 2008), tendo como principal característica a utilização de um sistema de coordenadas verticais híbridas. Em outras palavras, ele utiliza o sistema de coordenadas isopicnais para as áreas de oceano aberto e estratificado, coordenadas *z* (cartesianas) para a camada de mistura e regiões pouco estratificadas, e coordenadas sigma para regiões com menores profundidades e topografia de fundo variável (zonas costeiras).

Com o auxílio desses três sistemas de coordenadas, o modelo pode conservar as características das massas d'água por longos períodos de tempo em regiões oceânicas (coordenada isopicnal), obter alta resolução na camada de mistura ou em regiões com pouca estratificação (coordenada *z*), e resolver melhor a topografia de fundo em áreas costeiras ou sobre a plataforma continental (coordenada sigma).

Desta forma, o *HYCOM* é basicamente um modelo em camadas isopicnais, que pode realizar uma transição suave para os sistemas de coordenadas *z* e sigma, próximo aos contornos superiores e inferiores, ou quando a resolução vertical é inadequada (GABIOUX, 2008). A combinação das vantagens dos diferentes sistemas de coordenadas permite simular, de forma otimizada, as características da circulação oceânica e costeira, sendo atribuída ao usuário a determinação das zonas de transição entre os sistemas de coordenadas (CHASSIGNET *et al.*, 2003).

Para esta caracterização foram utilizados dados disponíveis do *HYCOM Consortium*. Os resultados do hindcast¹ que contempla a região da plataforma encontram-se disponíveis para utilização na página do projeto (<http://hycom.rsmas.miami.edu/dataserver/>). Os dados usados possuem uma resolução espacial de 1/12º e uma série temporal de janeiro de 2003 a janeiro de 2006. Os resultados obtidos pelo *HYCOM* se ajustam às principais características regionais descritas na literatura, o que valida a sua utilização neste estudo.

¹ O termo "hindcast" é usado para descrever previsões numéricas realizadas para tempos pretéritos. É uma tentativa de reconstituição das condições ambientais em um determinado período.

Os perfis de corrente, temperatura e salinidade utilizados como forçantes na simulação foram obtidos utilizando a técnica de análise de funções ortogonais empíricas (EOF), usada no auxílio à compreensão da variabilidade de fenômenos oceanográficos através de séries temporais. Uma descrição desta técnica pode ser encontrada em Emery e Thomson (2004).

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

Os perfis sintéticos construídos são resultados do primeiro modo da EOF, que representa a maior parte da variância. Quanto à variação temporal, optou-se por utilizar o valor modal deste dado, de forma a representar a situação mais freqüente.

O perfil de corrente obtido a partir desta análise é apresentado na Figura 2.

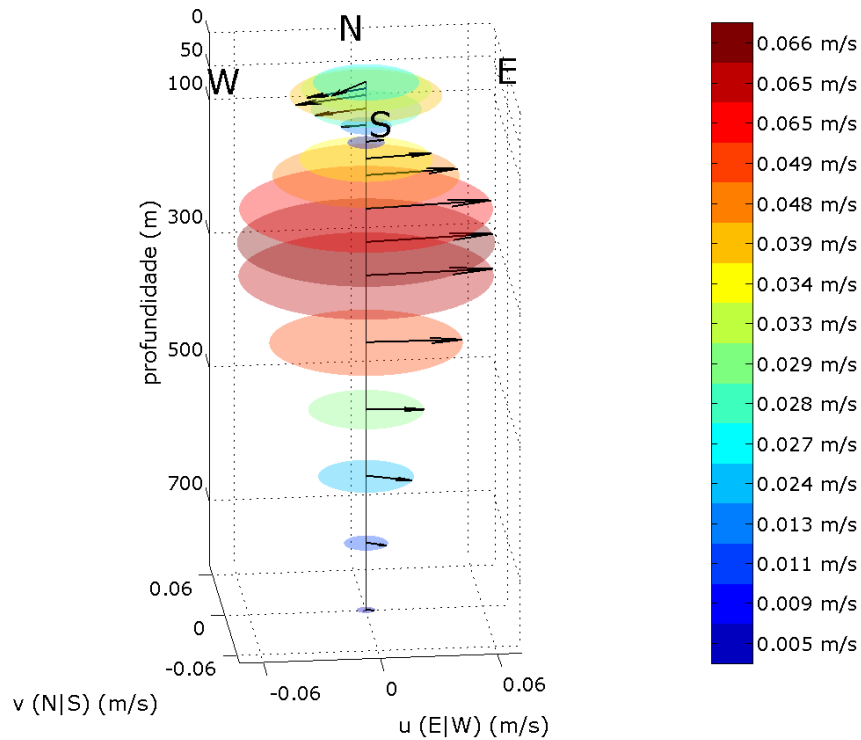


Figura 2: Perfil de correntes utilizado para as simulações. Os círculos envolvendo os vetores são proporcionais à velocidade e seus valores (em m/s) podem ser observados na escala de cor ao lado.

Nota-se a corrente fluindo para sudoeste, nos primeiros metros da coluna d'água, com uma inversão de direção para leste a partir da profundidade de 200 m. As maiores intensidades (em torno de 0,065 m/s) são observadas nas camadas intermediárias, próximo aos 300 m de profundidade.

Os valores das componentes da corrente utilizados nas simulações, resultantes da análise EOF, podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2: Componentes u e v , e intensidade da corrente.

| profundidade (m) | componente u (m/s) | componente v (m/s) | intensidade (m/s) |
|------------------|----------------------|----------------------|-------------------|
| 10 | -0,0194 | -0,0189 | 0,0271 |
| 20 | -0,0315 | -0,0107 | 0,0333 |
| 30 | -0,0373 | -0,0111 | 0,0389 |
| 50 | -0,0272 | -0,0077 | 0,0283 |
| 75 | -0,0130 | -0,0016 | 0,0131 |
| 100 | 0,0092 | 0,0021 | 0,0095 |
| 125 | 0,0336 | 0,0040 | 0,0339 |
| 150 | 0,0474 | 0,0047 | 0,0476 |
| 200 | 0,0644 | 0,0055 | 0,0646 |
| 250 | 0,0655 | 0,0053 | 0,0658 |
| 300 | 0,0649 | 0,0028 | 0,0650 |
| 400 | 0,0493 | -0,0015 | 0,0493 |
| 500 | 0,0292 | -0,0041 | 0,0295 |
| 600 | 0,0225 | -0,0096 | 0,0244 |
| 700 | 0,0097 | -0,0059 | 0,0113 |
| 800 | 0,0038 | -0,0027 | 0,0046 |

Os dados de temperatura e salinidade utilizados nas simulações são apresentados na Figura 3 e Tabela 3.

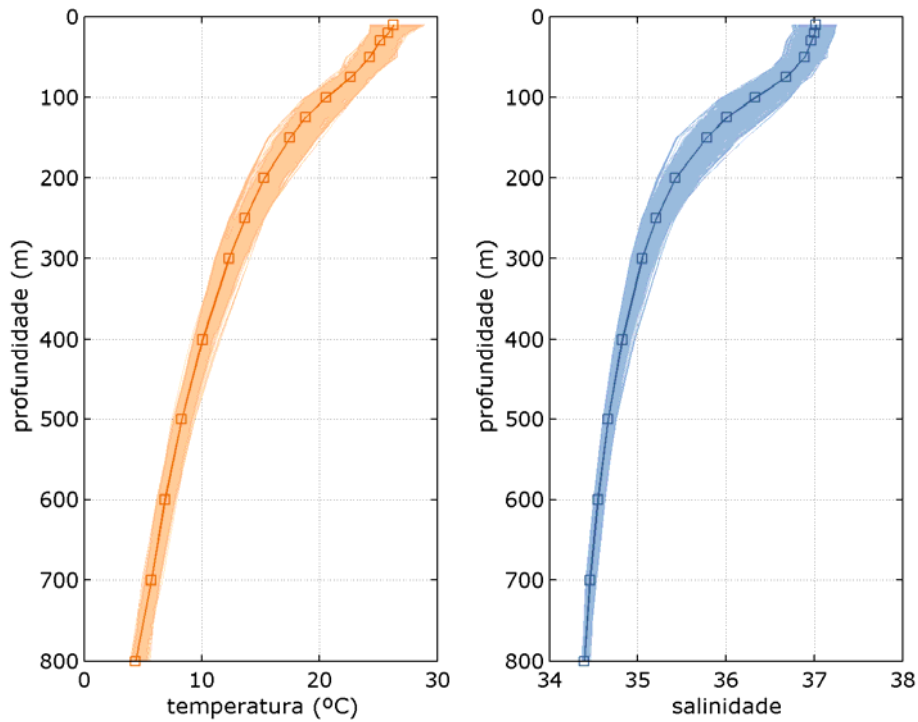


Figura 3: Perfis sintéticos de temperatura obtidos pelo *HYCOM* (linhas escuras) e o resultante do primeiro modo da EOF (nas cores mais claras) usado nas simulações.

Tabela 3: Dados de temperatura e salinidade com a profundidade.

| profundidade (m) | temperatura (°C) | salinidade |
|------------------|------------------|------------|
| 10 | 26,28 | 37,02 |
| 20 | 25,82 | 37,00 |
| 30 | 25,13 | 36,97 |
| 50 | 24,24 | 36,89 |
| 75 | 22,64 | 36,68 |
| 100 | 20,56 | 36,33 |
| 125 | 18,79 | 36,01 |
| 150 | 17,49 | 35,78 |
| 200 | 15,30 | 35,43 |
| 250 | 13,68 | 35,21 |
| 300 | 12,29 | 35,05 |
| 400 | 10,04 | 34,82 |
| 500 | 8,28 | 34,66 |
| 600 | 6,85 | 34,55 |
| 700 | 5,70 | 34,46 |
| 800 | 4,37 | 34,40 |

III.2. Onda

De acordo com INNOCENTINI et al (2000), os fenômenos meteorológicos responsáveis pela geração das ondas que atingem o litoral brasileiro são muito variáveis. Segundo os autores, a região que se estende de Natal (RN) a Vitória (ES), incluindo, assim, a região do Bloco BM-ES-37, possui comportamento semelhante quanto ao regime de ondas incidente.

Uma das características dessa região é ser atingida na maior parte do tempo por ondas geradas pelo flanco esquerdo do anticiclone subtropical do Atlântico Sul, com direção principal de NE. Entretanto, essa região pode ser também atingida por enormes pistas de SE, associadas à passagem de frentes frias, ocasionando eventos extremos com alturas significativas de ondas que podem chegar a 2,5m.

Uma estatística de ondas realizada por HOGBEN e LUMB (1967, apud DOMINGUEZ *et al*, 1992) indica uma relação direta entre a velocidade e a direção dos ventos alíseos, e a direção, altura e período das ondas que atingem a região. Essa estatística indica que na costa leste do Brasil existe uma predominância ao longo de todo o ano de vagas de N-NE, com uma altura significativa média de 1,0m e um período médio de 5s.

Na Tabela 4 são apresentados os valores utilizados nas simulações.

Tabela 4: 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 por um modelo integral. Este módulo acompanha a evolução do efluente do momento em que este deixa a fonte até que ele 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 esta primeira etapa, inicia-se a fase de *colapso dinâmico*, onde o efluente se espalhará na profundidade em que se estabilizou devido, ainda, a sua diferença de densidade com relação ao 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, denominada de 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.

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 aquela 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 12,5 m e uma área de 1.500.000 m² (~1,500 km²). A segunda (grade 2), projetada para a região de maior acúmulo de sedimentos, possui uma resolução espacial de 1,5 m e cobre uma área de 22.500 m² (0,023 km²).

A comparação das duas grades projetadas e seus pontos de lançamento podem ser observados na Figura 4.

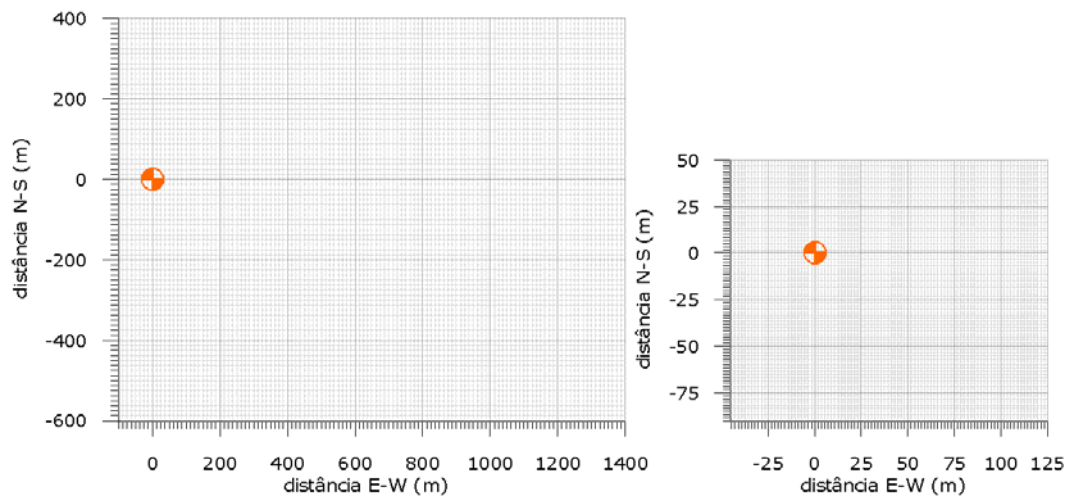


Figura 4: Comparação entre as duas grades projetadas para o estudo. A marcação em laranja representa a posição do ponto de lançamento em cada grade.

IV.3. Descrição dos Descartes

Na Tabela 5 são apresentadas as simulações realizadas e os códigos a elas associados neste estudo.

Tabela 5: Relação das simulações realizadas no estudo

| simulação | tipo de descarte | seção |
|-----------|----------------------------|-------|
| SOL_SEC1 | cascalhos e fluido aderido | 1 |
| SOL_SEC2 | cascalhos e fluido aderido | 2 |
| SOL_SEC3 | cascalhos e fluido aderido | 3 |
| SOL_SEC4 | cascalhos e fluido aderido | 4 |
| FLU_SEC4 | fluido excedente | 4 |

No modelo OOC são necessários os seguintes parâmetros para caracterização do descarte:

- 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 ρ .

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

Utilizando a seção 1 como exemplo, consideramos $V_{\text{fluido}} = 208 \text{ m}^3$, $V_{\text{cascalho}} = 31,5 \text{ m}^3$, $\rho_{\text{fluido}} = 1030 \text{ Kg/m}^3$, $\rho_{\text{cascalho}} = 2700 \text{ Kg/m}^3$. Considerando a equação acima, chega-se a uma densidade do efluente $\rho_{\text{efluente}} = 1249,77 \text{ Kg/m}^3$ 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 |
|-------------------------------------|----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| V_{total} | m^3 | 239,5 | 1229,4 | 559,9 | 506,5 |
| $V_{casalho}$ | m^3 | 31,5 | 264,4 | 446,9 | 404,5 |
| V_{fluido} | m^3 | 208,0 | 965,0 | 113,0 | 102,0 |
| $f_{casalho}$ | % | 13,16% | 21,51% | 79,82% | 79,86% |
| f_{fluido} | % | 86,84% | 78,49% | 20,18% | 20,14% |
| ρ_{casc} | kg/m^3 | 2700,0 | 2700,0 | 2700,0 | 2700,0 |
| ρ_{fluido} | kg/m^3 | 1030,0 | 1030,0 | 1100,0 | 1200,0 |
| $\rho_{efluente}$ | kg/m^3 | 1249,77 | 1389,20 | 2377,09 | 2397,94 |

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:

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

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 distribuições genéricas de velocidades de queda baseadas em Brandsma e Smith (1999). Estas distribuições foram obtidas a partir de uma quantidade representativa de experimentos e são aconselhadas no manual do modelo para quando os dados locais são desconhecidos (Tabela 7 e Tabela 8).

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

| Classe | Fração de 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 | 0,000001 |

Tabela 8: Densidade, fração de volume e velocidade de queda para os descartes dos sólidos de fluido de base aquosa.

| Classe | Fração de volume | velocidade de queda (m/s) |
|--------|------------------|---------------------------|
| 1 | 0,0100 | 0,011217 |
| 2 | 0,0400 | 0,003170 |
| 3 | 0,1924 | 0,000823 |
| 4 | 0,1924 | 0,000640 |
| 5 | 0,1326 | 0,000512 |
| 6 | 0,1326 | 0,000436 |
| 7 | 0,1000 | 0,000300 |
| 8 | 0,0500 | 0,000148 |
| 9 | 0,0799 | 0,000061 |
| 10 | 0,0701 | 0,000027 |

A distribuição obtida para a mistura de cascalhos e sólidos de fluido de base aquosa 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 consequência, com maiores velocidades de queda. Para corrigir este efeito, usa-se no modelo um coeficiente de ajuste, cujo valor indicado no manual (Brandsma e 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 adaptar-se aos descartes a serem realizados através da equação:

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

As matrizes calculadas para cada descarte são apresentadas da Tabela 9 à Tabela 13.

Tabela 9: Matriz de densidade, fração e velocidade de queda para o descarte SOL_SEC1. Nesta simulação foi usado o coeficiente ASFM=28.

| sólido | dens (g/cm ³) | f _{OOC} | vel queda (m/s) |
|--------|---------------------------|------------------|-----------------|
| sol1 | 2,3093 | 0,044 | 0,2597506 |
| sol2 | 2,3093 | 0,026 | 0,1351788 |
| sol3 | 2,3093 | 0,028 | 0,0979627 |
| sol4 | 2,3093 | 0,032 | 0,0401117 |
| sol5 | 2,3093 | 0,004 | 0,0144719 |
| sol6 | 2,3093 | 0,005 | 0,0023281 |
| sol7 | 2,3093 | 0,012 | 0,0002182 |
| sol8 | 2,3093 | 0,011 | 0,0000169 |
| sol9 | 2,3093 | 0,014 | 0,0000014 |

Tabela 10: Matriz de densidade, fração e velocidade de queda para o descarte SOL_SEC2. Nesta simulação foi usado o coeficiente ASFM=28.

| sólido | dens (g/cm ³) | f _{OOC} | vel queda (m/s) |
|--------|---------------------------|------------------|-----------------|
| sol1 | 2,4570 | 0,064 | 0,2597506 |
| sol2 | 2,4570 | 0,038 | 0,1351788 |
| sol3 | 2,4570 | 0,041 | 0,0979627 |
| sol4 | 2,4570 | 0,046 | 0,0401117 |
| sol5 | 2,4570 | 0,005 | 0,0144719 |
| sol6 | 2,4570 | 0,008 | 0,0023281 |
| sol7 | 2,4570 | 0,018 | 0,0002182 |
| sol8 | 2,4570 | 0,015 | 0,0000169 |
| sol9 | 2,4570 | 0,020 | 0,0000014 |

Tabela 11: Matriz de densidade, fração e velocidade de queda para o descarte da SOL_SEC3. Nesta simulação foi usado o coeficiente ASFM=28.

| sólido | dens (g/cm ³) | f _{ooc} | vel queda (m/s) |
|--------|---------------------------|------------------|-----------------|
| sol1 | 2,6994 | 0,202 | 0,2597506 |
| sol2 | 2,6994 | 0,121 | 0,1351788 |
| sol3 | 2,6994 | 0,129 | 0,0979627 |
| sol4 | 2,6994 | 0,145 | 0,0401117 |
| sol5 | 2,6994 | 0,016 | 0,0144719 |
| sol6 | 2,6994 | 0,024 | 0,0023281 |
| sol7 | 2,6994 | 0,057 | 0,0002182 |
| sol8 | 2,6994 | 0,048 | 0,0000169 |
| sol9 | 2,6994 | 0,065 | 0,0000014 |

Tabela 12: Matriz de densidade, fração e velocidade de queda para o descarte da SOL_SEC4. Nesta simulação foi usado o coeficiente ASFM=28.

| sólido | dens (g/cm ³) | f _{ooc} | vel queda (m/s) |
|--------|---------------------------|------------------|-----------------|
| sol1 | 2,6994 | 0,202 | 0,2597506 |
| sol2 | 2,6994 | 0,121 | 0,1351788 |
| sol3 | 2,6994 | 0,129 | 0,0979627 |
| sol4 | 2,6994 | 0,146 | 0,0401117 |
| sol5 | 2,6994 | 0,016 | 0,0144719 |
| sol6 | 2,6994 | 0,024 | 0,0023281 |
| sol7 | 2,6994 | 0,057 | 0,0002182 |
| sol8 | 2,6994 | 0,049 | 0,0000169 |
| sol9 | 2,6994 | 0,065 | 0,0000014 |

Tabela 13: Matriz de densidade, fração e velocidade de queda para o descarte FLU_SEC4.

| sólido | dens (g/cm ³) | f _{ooc} | vel queda (m/s) |
|--------|---------------------------|------------------|-----------------|
| sol1 | 2,6500 | 0,001 | 0,0112166 |
| sol2 | 2,6500 | 0,002 | 0,0031699 |
| sol3 | 2,6500 | 0,010 | 0,0008230 |
| sol4 | 2,6500 | 0,010 | 0,0006401 |
| sol5 | 2,6500 | 0,007 | 0,0005121 |
| sol6 | 2,6500 | 0,007 | 0,0004359 |
| sol7 | 2,6500 | 0,005 | 0,0003002 |
| sol8 | 2,6500 | 0,003 | 0,0001478 |
| sol9 | 2,6500 | 0,004 | 0,0000610 |
| sol10 | 2,6500 | 0,004 | 0,0000274 |

IV.5. Tempo de Descarte

O modelo OOC é melhor adaptado à representação de descartes de curta duração. Entretanto, conhecendo-se as características do meio e do descarte, é possível representar descartes de longa duração com este modelo. Os métodos são usados de acordo com o tipo

de impacto que busca-se analisar: a pilha de deposição final no assoalho marinho ou a pluma de sólidos em suspensão na coluna d'água.

IV.5.1. Pilhas de Deposição

Conhecendo a profundidade na qual 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.

Os tempos obtidos para cada descarte são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14: Tempo de queda estimado (em horas) para cada classe de sólido nos descartes a serem realizados.

| classe | SOL_SEC1 SOL_SEC2 | SOL_SEC3 SOL_SEC4 | FLU_SEC4 |
|--------|----------------------|----------------------|----------|
| 1 | 0,01 | 0,97 | 22,41 |
| 2 | 0,01 | 1,86 | 79,30 |
| 3 | 0,02 | 2,57 | 305,47 |
| 4 | 0,05 | 6,27 | 392,75 |
| 5 | 0,13 | 17,37 | 490,93 |
| 6 | 0,84 | 107,98 | 576,76 |
| 7 | 8,91 | 1151,91 | 837,33 |
| 8 | 115,36 | 14914,41 | 1700,55 |
| 9 | 1440,05 | 186177,59 | 4123,83 |
| 10 | - | - | 9164,08 |

A representação gráfica dos tempos de queda estimados, para cada classe de grão com seu respectivo volume percentual, pode ser observada na Figura 5.

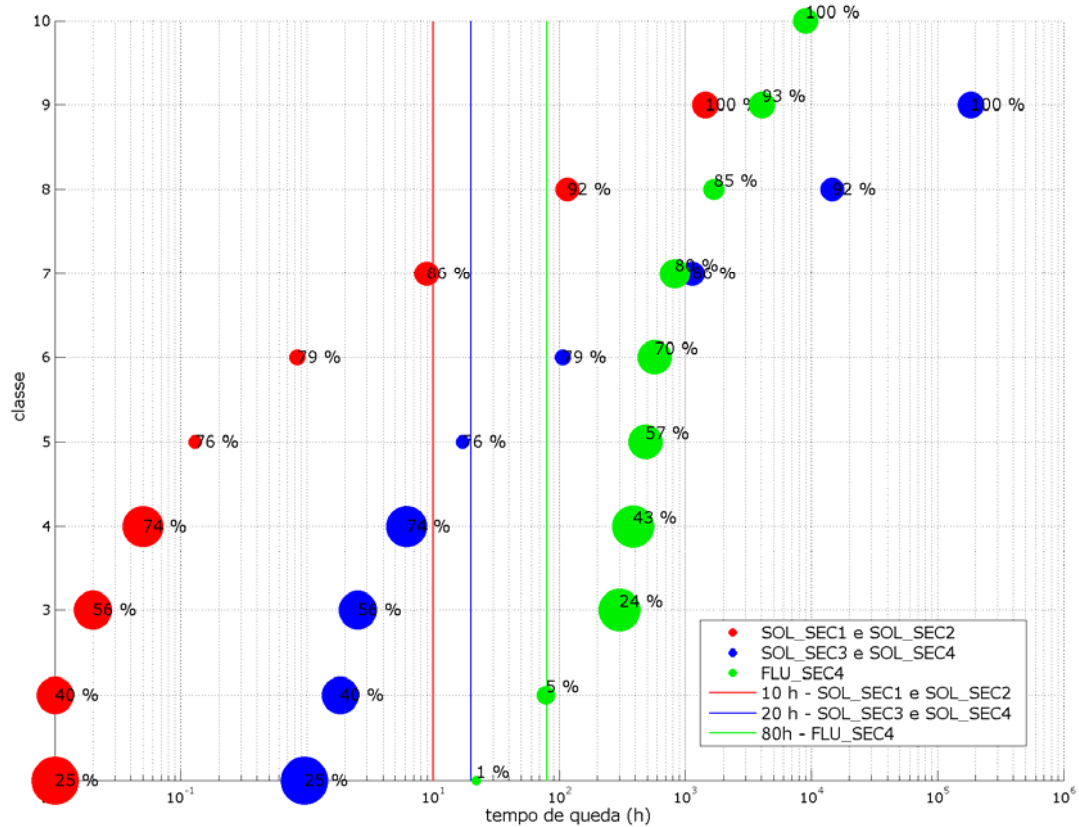


Figura 5: Tempo de queda das partículas de acordo com a classe granulométrica de cada tipo de descarte. O tamanho dos círculos é proporcional à fração de volume que cada classe representa, os rótulos em cada círculo representam a soma cumulativa das frações. As linhas em vermelho, azul e verde representam a duração das simulações realizadas.

Nos descartes SOL_SEC1 e SOL_SEC2, a maior porcentagem do material (79%) deposita-se em um intervalo de tempo inferior a 1 hora (10^0 h). No entanto, mesmo com a proximidade do fundo, o restante do material só será completamente depositado após 100 horas. Para os descartes com *riser* (SOL_SEC3 e SOL_SEC4), estima-se que quase a mesma proporção do material (76%) levará 20 horas para se depositar. Já no descarte de fluido excedente, FLU_SEC4, apenas uma pequena fração do material (5%) se depositará em menos de 80 horas.

A partir desta análise e visando otimizar o custo computacional e a quantidade de material depositado, definiu-se um tempo de simulação de 10 horas para a estimativa das pilhas de deposição das seções sem *riser* e um tempo de 20 horas para a estimativa das seções com *riser*. Não foi simulado deposição para os descartes de fluido excedente uma vez que a primeira parcela do efluente (1%) só começa a se depositar após 20 horas do início do descarte.

IV.5.2. Plumaz de Sólidos em Suspensão

Para os sólidos em suspensão, como objetiva-se monitorar um impacto transiente, é preciso conhecer antes os tempos em que a pluma assume um caráter estacionário ao longo da coluna d'água. Este tempo irá depender da intensidade da corrente local, da duração do descarte e da distância de interesse.

O método proposto 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}):

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

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

local, AL um parâmetro de dissipação e σ_0 tamanho inicial da pluma, estimado na ordem de grandeza do tubo de descarte.

Para o cálculo das plumas de sólidos em suspensão foi usado um tempo de descarte de 2 horas e, baseado na equação acima, foram estimados os tempos para as estimativas em cada distância da fonte, conforme apresentado da Tabela 15 a Tabela 17.

Tabela 15: Tempo, final e inicial, calculado para determinar a estacionariedade da pluma e tempo estimado para observação da pluma formada pelos descartes SOL_SEC1 e SOL_SEC2.

| distância da fonte (m) | $t_{início}$ (h) | t_{final} (h) | $t_{estimativa}$ (h) |
|------------------------|------------------|-----------------|----------------------|
| 10 | 0,60 | 2,52 | 2 |

Tabela 16: Tempo, final e inicial, calculado para determinar a estacionariedade da pluma e tempo estimado para observação da pluma formada pelos descartes SOL_SEC3 e SOL_SE4.

| distância da fonte (m) | $t_{início}$ (h) | t_{final} (h) | $t_{estimativa}$ (h) |
|------------------------|------------------|-----------------|----------------------|
| 10 | 0,06 | 2,06 | 1 |
| 50 | 0,30 | 2,30 | 1 |
| 100 | 0,61 | 2,60 | 2 |
| 250 | 1,52 | 3,50 | 3 |

Tabela 17: Tempo, final e inicial, calculado para determinar a estacionariedade da pluma e tempo estimado para observação da pluma formada pelo descarte FLU_SEC4.

| distância da fonte (m) | t_{início} (h) | t_{final} (h) | t_{estimativa} (h) |
|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| 10 | 0,09 | 2,08 | 1 |
| 50 | 0,43 | 2,42 | 1 |
| 100 | 0,85 | 2,83 | 2 |
| 250 | 2,13 | 4,08 | 3 |

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.

V.1. Pilhas de Deposição

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 5 e Tabela 15), os tempos escolhidos para cada simulação foram:

10 h – descartes das seções sem *riser*.

20 h – descartes das seções com *riser*.

V.1.1. Grade 1

As pilhas formadas por cada simulação podem ser observadas da Figura 6 à Figura 9 e a integração dos resultados na Figura 10. Observa-se que tanto as pilhas formadas nas seções sem *riser* quanto as das seções com *riser* apresentam orientação leste/sudeste.

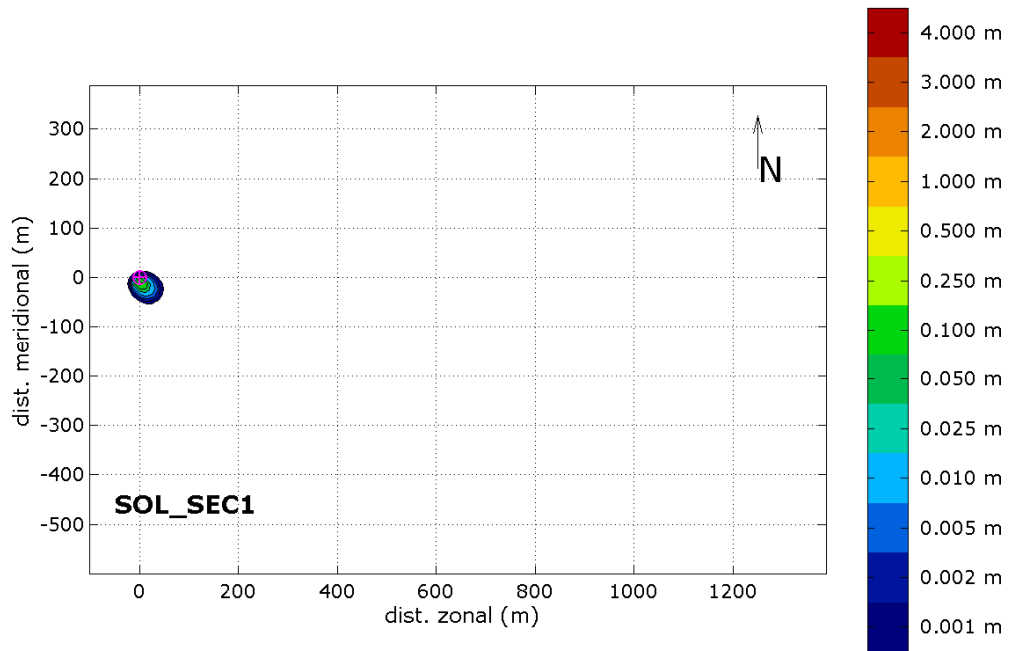


Figura 6: Pilha de deposição encontrada para o descarte SOL_SEC1 realizado com a grade 1.

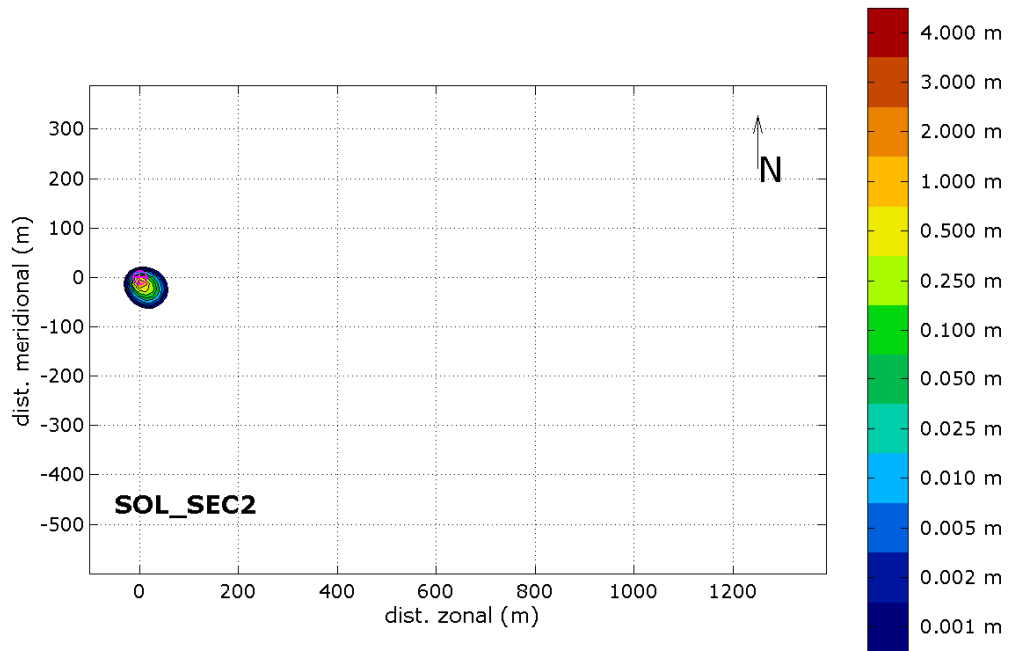


Figura 7: Pilha de deposição encontrada para o descarte SOL_SEC2 realizado com a grade 1.

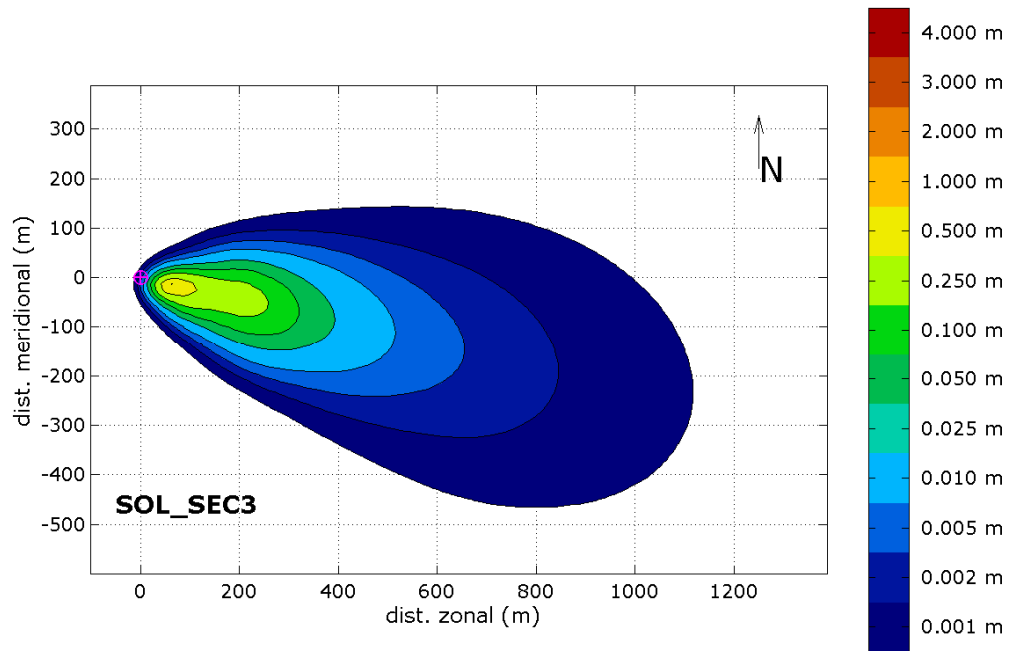


Figura 8: Pilha de deposição encontrada para o descarte SOL_SEC3 realizado com a grade 1.

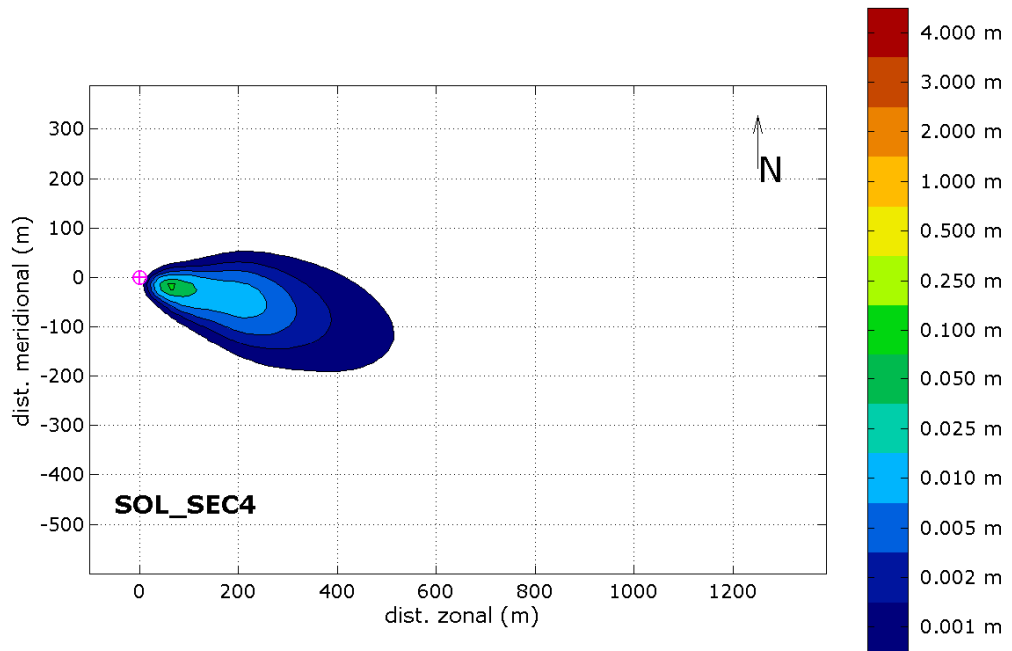


Figura 9: Pilha de deposição encontrada para o descarte SOL_SEC4 realizado com a grade 1.

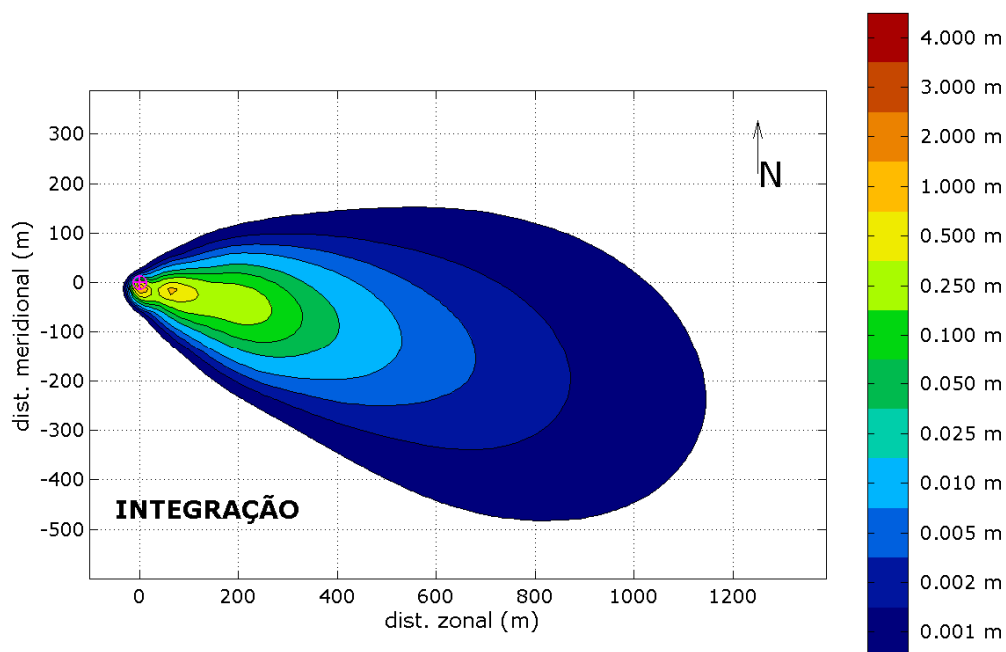


Figura 10: Pilha resultante da integração de todos os descartes realizados com a grade 1.

Um resumo dos resultados obtidos para a deposição de sólidos é apresentado na Tabela 18.

Tabela 18: Resumo dos resultados obtidos para as pilhas de deposição obtidas com a grade 1.

| simulação | esp. máxima (m) | área (m ²) | volume capturado |
|-------------------|-----------------|------------------------|------------------|
| SOL_SEC1 | 0,1462 | 3749,91 | 91,7% |
| SOL_SEC2 | 1,0739 | 5468,62 | 92,1% |
| SOL_SEC3 | 0,5042 | 488113,13 | 71,0% |
| SOL_SEC4 | 0,0553 | 87029,13 | 71,5% |
| INTEGRAÇÃO | 1,2263 | 522487,29 | |

O descarte responsável pela maior espessura é o SOL_SEC2 (1,07m) e o descarte SOL_SEC3 forma a maior área (488.113,13 m²). A pilha final cobre uma área de 522.487,29 m².

V.1.2. 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, com a utilização desta grade, uma correta estimativa das espessuras máximas formadas nestes descartes.

As pilhas formadas são apresentadas da Figura 11 a Figura 14. A integração dos resultados é apresentada na Figura 15.

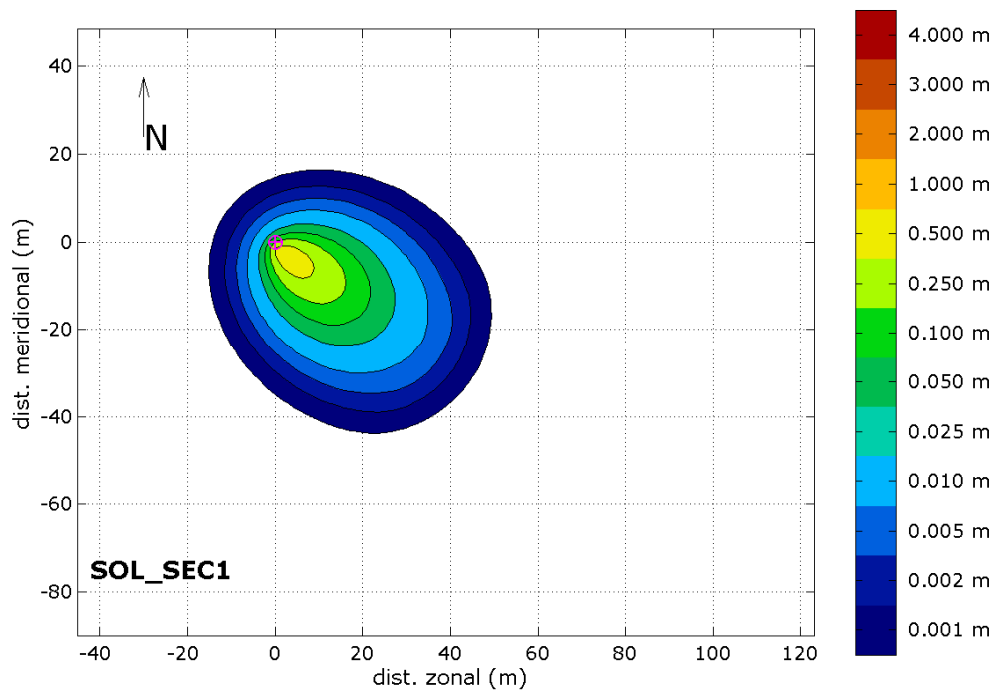


Figura 11: Pilha de deposição encontrada para o descarte SOL_SEC1 realizado com a grade 2.

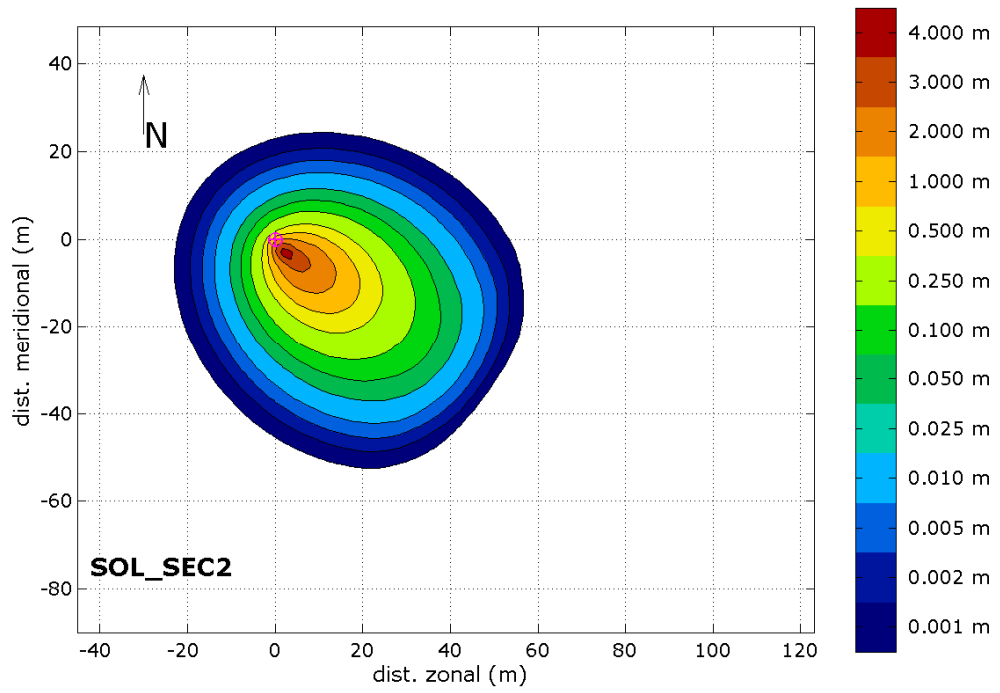


Figura 12: Pilha de deposição encontrada para SOL_SEC2 com a grade 2.

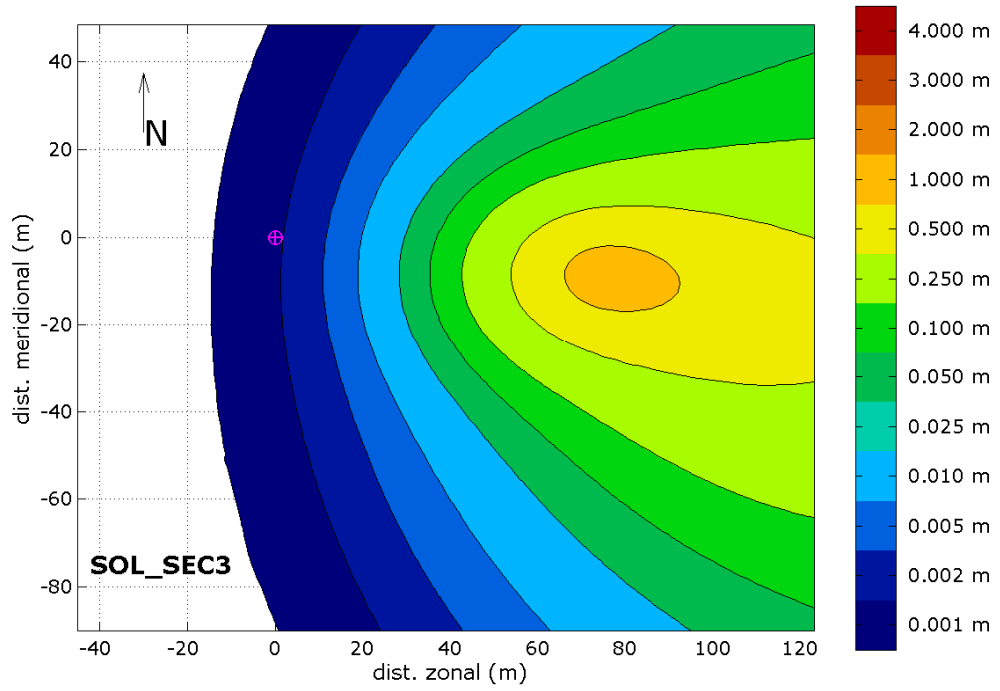


Figura 13: Pilha de deposição encontrada para SOL_SEC3 com a grade 2.

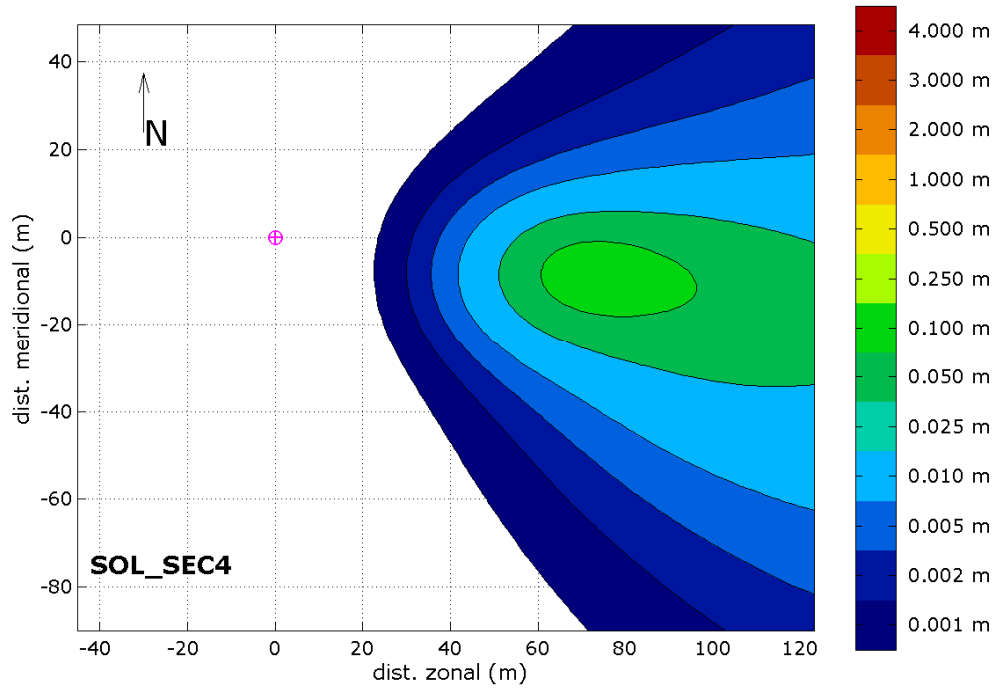


Figura 14: Pilha de deposição encontrada para SOL_SEC4 com a grade 2.

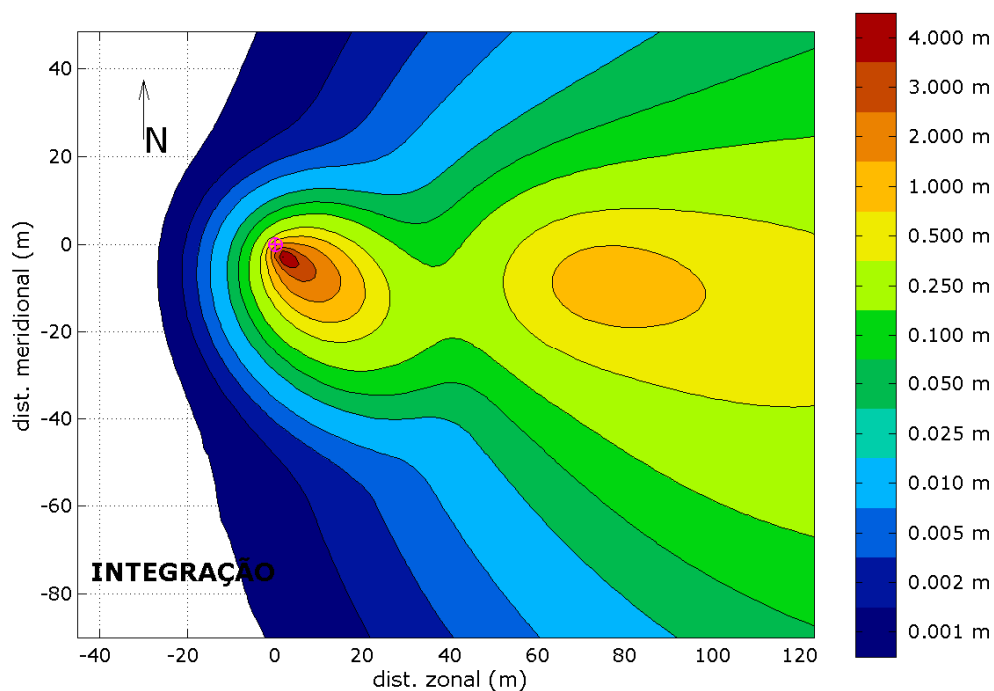


Figura 15: Pilha resultante da integração de todos os descartes realizados com a grade 2.

Na pilha final são observadas duas regiões com espessuras superiores a 50 cm. Uma formada próximo ao ponto de descarte e sendo atribuída aos descartes das seções sem *riser* e a outra a, aproximadamente, 80 m de distância do ponto de descarte, sentido leste. Esta segunda região pode ser atribuída aos descartes das seções que fazem uso do *riser*.

As espessuras máximas encontradas com a grade 2, para cada seção, são apresentadas na Tabela 19.

Tabela 19: Resumo dos resultados obtidos para as pilhas de deposição obtidas com a grade 2.

| simulação | esp. máxima (m) |
|-------------------|-----------------|
| SOL_SEC1 | 0,4929 |
| SOL_SEC2 | 3,5504 |
| SOL_SEC3 | 0,6105 |
| SOL_SEC4 | 0,0712 |
| INTEGRAÇÃO | 4,0195 |

A pilha resultante apresentou uma espessura máxima de 4 m, com a maior contribuição sendo do descarte SOL_SEC2 (~3,6 m).

V.2. Plumas de Sólidos em Suspensão

As plumas de sólidos em suspensão formadas pelos descartes foram monitoradas através de seções radiais verticais na coluna d'água, posicionadas a distâncias específicas da fonte, até atingirem uma concentração de 5 mg/L (*limiar monitorado*). A posição das radiais foi escolhida a fim de melhor representar a localização da pluma. Para se obter uma melhor visualização do limiar atingido, optou-se por representar a pluma até uma concentração de 1 mg/L (*limiar de corte*).

A representação esquemática das radiais escolhidas pode ser observada na Figura 16 (descartes sem *riser*), Figura 17 (descartes com *riser*) e Figura 18 (descarte de fluido excedente).

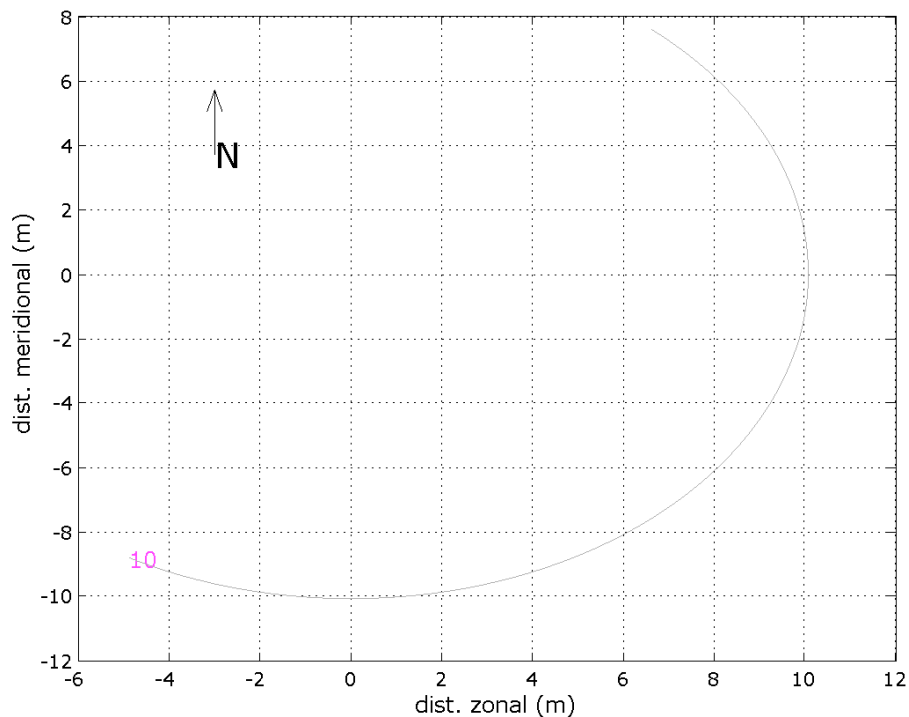


Figura 16: Posição das radiais usadas para monitoramento da pluma de sólidos em suspensão nos descartes sem *riser*.

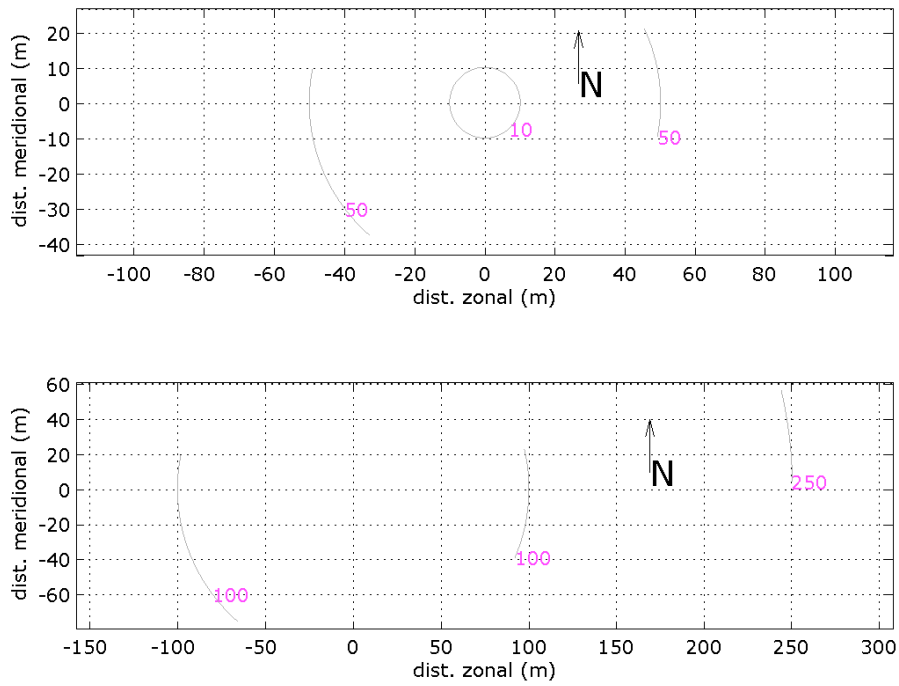


Figura 17: Posição das radiais usadas para monitoramento da pluma de sólidos em suspensão nos descartes com *riser*.

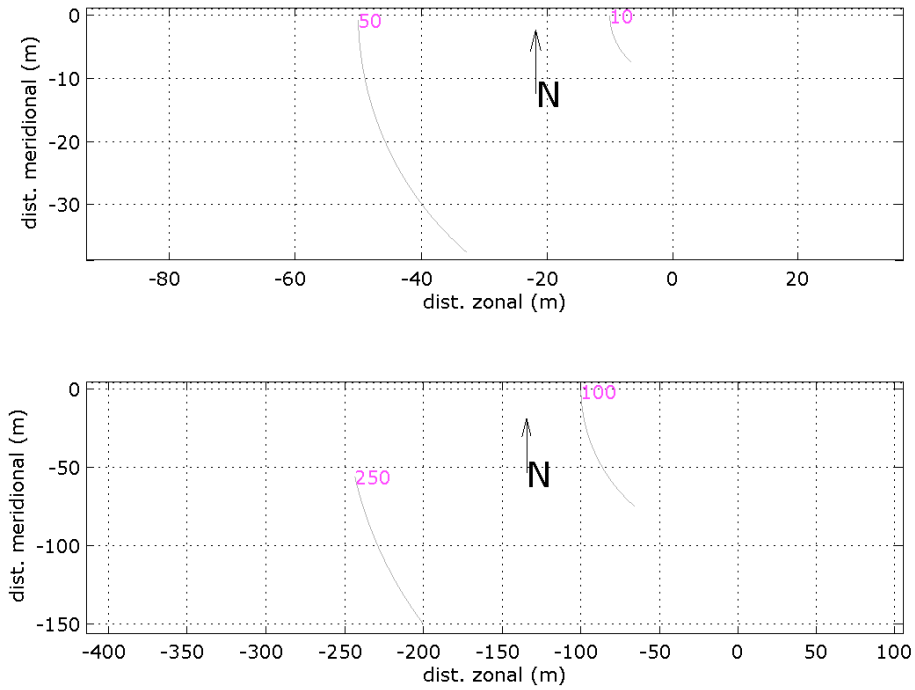


Figura 18: Posição das radiais usadas para monitoramento da pluma de sólidos em suspensão no descarte de fluido excedente.

As plumas obtidas para os descartes sem riser (SOL_SEC1 e SOL_SEC2) são apresentadas nas Figura 19 e Figura 20, respectivamente.

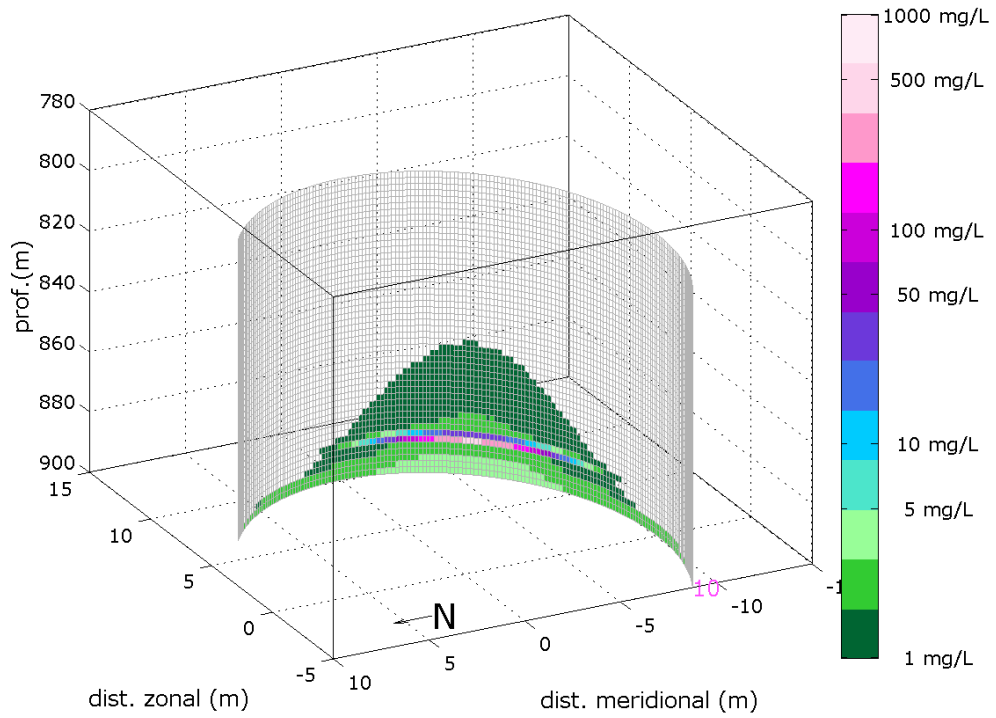


Figura 19: Pluma de sólidos em suspensão formada em SOL_SEC1.

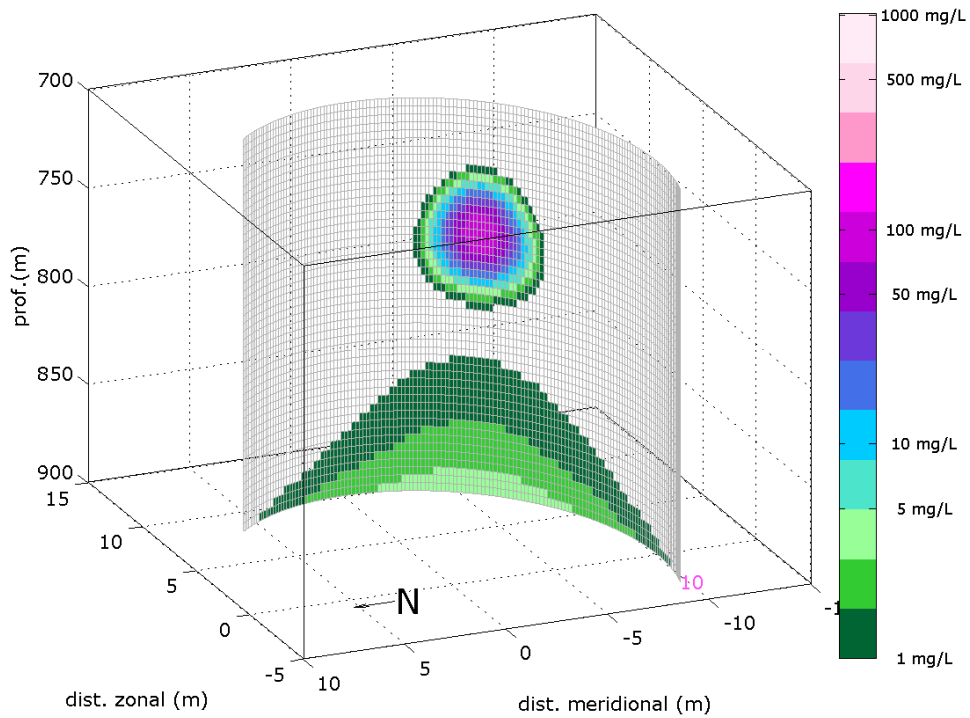


Figura 20: Pluma de sólidos em suspensão formada em SOL_SEC2.

Nota-se que, em ambas as seções, que a pluma apresenta concentrações ainda superiores que 100 mg/L na primeira radial (10 m). No entanto, a 50 m da fonte, não foram observadas concentrações superiores ao limiar de corte (1 mg/L).

As plumas formadas nos descartes SOL_SEC3 e SOL_SEC4 são apresentadas na Figura 21 e Figura 22.

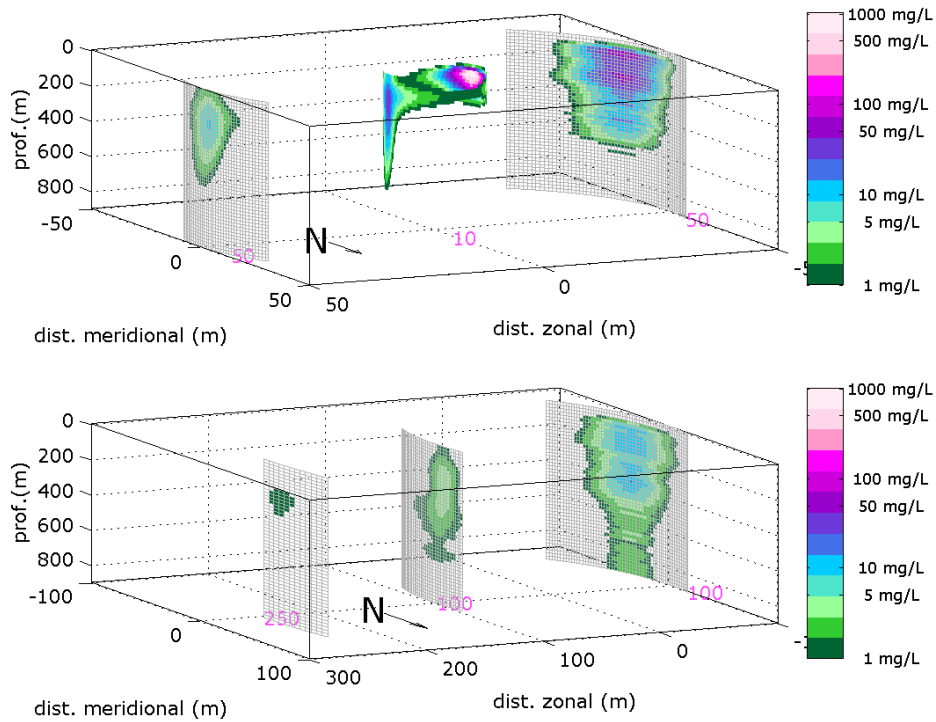


Figura 21: Pluma de sólidos em suspensão formada em SOL_SEC3.

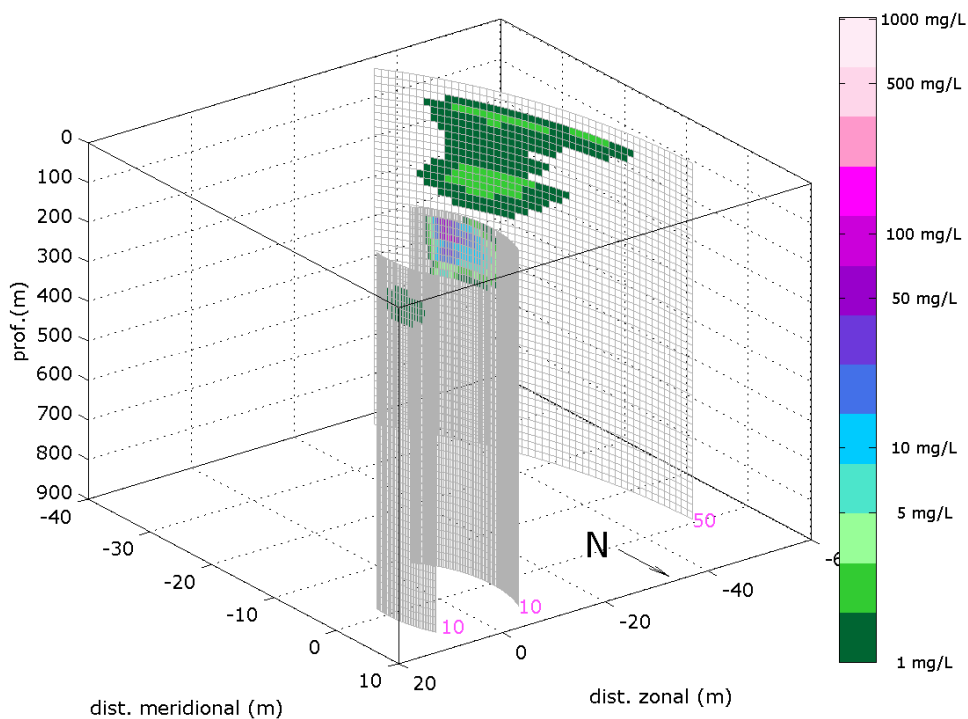


Figura 22: Pluma de sólidos em suspensão formada em SOL_SEC4.

Como era esperado para um descarte com *riser*, ambas as plumas sofrem influência da hidrodinâmica simulada para a região, apresentando assim uma orientação para sudoeste, nos primeiros metros, com uma inversão para leste abaixo dos 200 m de profundidade.

Observa-se também que a pluma do descarte SOL_SEC3 só atinge o limiar monitorado após os 100 m de distância da fonte, provavelmente por apresentar uma vazão maior em relação ao outro descarte.

A pluma formada no descarte FLU_SEC4 é apresentada na Figura 23.

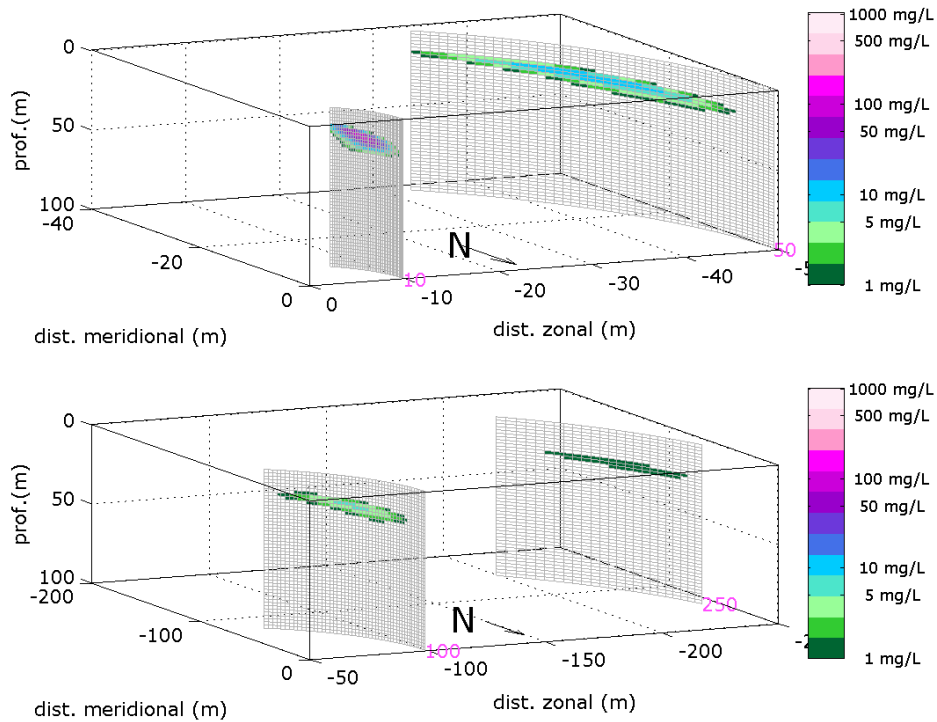


Figura 23: Pluma de sólidos em suspensão formada em FLU_SEC4.

Nota-se que a pluma só atinge o limiar monitorado de 5mg/L após 100 metros de distância da fonte e que a ocupação na coluna d'água com concentrações superiores ao limiar de corte restringe-se aos primeiros 50 m.

As concentrações máximas obtidas em cada radial para as plumas de todos os descartes são apresentadas na Tabela 20.

Tabela 20: Concentração máxima (mg/L) de sólidos em suspensão em cada radial para todos descartes realizados.

| distância da fonte (m) | concentração (mg/L) | | | | |
|------------------------|---------------------|----------|----------|----------|----------|
| | SOL_SEC1 | SOL_SEC2 | SOL_SEC3 | SOL_SEC4 | FLU_SEC4 |
| 10 | 358,48 | 104,38 | 993,84 | 77,16 | 82,99 |
| 50 | 0,04 | 0,09 | 54,55 | 2,30 | 13,98 |
| 100 | - | - | 14,29 | - | 5,31 |
| 250 | - | - | 1,11 | - | 1,36 |

As plumas formadas nos descartes SOL_SEC3 e FLU_SEC4 são as que atingem uma maior distância da fonte (100 m) ainda com níveis de concentração máxima acima do monitorado (5 mg/L). Porém, os maiores valores são obtidos no descarte SOL_SEC3.

VI. CONCLUSÕES

Simulações numéricas foram realizadas para determinar o comportamento do material a ser descartado no mar pela atividade de perfuração do projeto de poço 416 A EX, no bloco BM-ES-37, Bacia do Espírito Santo.

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 bem 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 das seções com e sem *riser* apresentou orientação leste/sudeste concordando com a hidrodinâmica descrita no experimento (*HYCOM*, 2008) para a região e com a encontrada na literatura.

A espessura máxima obtida, calculada pela grade 2, foi de 4,02 m e a área coberta pela pilha, estimada com a grade 1, abrange 522.487,29m². O descarte que mais contribuiu para a espessura resultante foi de cascalho e fluido aderido SOL_SEC2, com 3,55 m e para a área, o descarte SOL_SEC3, com 488.113,13m².

As plumas de sólidos em suspensão foram monitoradas até atingirem uma concentração de 5 mg/L. Dentre todos os descartes, o descarte de cascalho e fluido aderido da seção 3 e o descarte de fluido excedente da seção 4 foram os que atingiram uma maior distância da fonte com concentrações acima do limiar (100 m). Porém, os maiores valores de concentração são apresentados pelo descarte da seção 3.

Desta forma, pode-se considerar que o descarte SOL_SEC3 é o responsável pelo maior impacto de concentração de sólidos em suspensão, por manter valores superiores aos demais descartes a uma maior distância da fonte. E que o maior responsável pela espessura máxima encontrada na pilha de deposição é o descarte SOL_SEC2.

VII. BIBLIOGRAFIA

- BRANDSMA, M. & SMITH, J., 1999.** Offshore Operators Committee Mud and Produced Water Discharge Model Report and User Guide. *ExxonMobil Upstream Research Co.*
- CHASSIGNET, E. P.; SMITH, L. T.; HALLIWEL, G. R., 2003.** "North Atlantic Simulations with the HYbrid Coordinate Ocean Model (HYCOM): Impact of the vertical coordinate choice, reference pressure, and termobaricity", *Journal Physical Oceanography*, v. 33, n. 12, pp. 2504-2526.
- DOMINGUEZ, L. M. J.; BITTENCOURT, P. S. DA C. A.; MARTIN, L.** Controls on Quaternary coastal evolution of the east-northeastern coast of Brazil: roles of sea-level history, trade winds and climate. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam. *Sedimentary Geology*, 80 (1992) 213-232.
- EMERY, W. J., & THOMSON, R. E., 2004.** Data analysis methods in physical oceanography. 2nd and Revised Edition. Elsevier Science BV, Amsterdam, 638 pp.
- GABIOUX, M. 2008.** Estudo numérico dos meandros e vórtices da corrente do Brasil entre 22°S e 30°S [Rio de Janeiro] 2008 XVII, 138 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Oceânica, 2008) Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.
- HYCOM, 2008.** Assimilative Global Simulation (10/2008 to 11/2008), [online] Disponível via WWW. URL: http://hycom.coaps.fsu.edu/data/glb_simulation.html.
- INNOCENTINI, V.; CUNHA PRADO, S.C.S.; PEREIRA, C.S.; OLIVEIRA ARANTES, F.; BRANDÃO, I.N.** Marulhos no litoral norte do Brasil gerados por furacões: caso de 24 de outubro de 1999. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000, Rio de Janeiro. Anais...Rio de Janeiro: SBMET, 2000. 128 p.