

Copyright 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico Científico foi preparado para apresentação no 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, a ser realizado no período de 2 a 5 de outubro de 2005, em Salvador. Este Trabalho Técnico Científico foi selecionado e/ou revisado pela Comissão Científica, para apresentação no Evento. O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho será publicado nos Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás

MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO LANÇAMENTO DE CASCALHOS DE PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO EM ÁGUAS PROFUNDAS

Gerônimo Joaquim Dias ¹, Alvaro Luiz Gayoso de Azeredo Coutinho ², Renato Parkinson Martins ¹

¹ Petróleo Brasileiro S/A – PETROBRAS/CENPES/PDP/MC,
CENPES - Cidade Universitária - Ilha do Fundão - Rio de Janeiro - RJ,
{[gjdias](mailto:gjdias@petrobras.com.br), [renatopm](mailto:renatopm@petrobras.com.br)}@petrobras.com.br

² Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ
Centro de Tecnologia - Cidade Universitária - Ilha do Fundão – Rio de Janeiro RJ,
alvaro@nacad.ufrj.br

Resumo – Este trabalho apresenta a implementação de uma nova metodologia para a simulação numérica do descarte de cascalhos de perfuração de poços de petróleo em águas profundas através do emprego de uma ferramenta de fluidodinâmica computacional (CFD). São apresentadas simulações tridimensionais para os problemas de lançamento de cascalhos de perfuração, um dos principais rejeitos das atividades de exploração e produção de petróleo em oceano aberto. O trabalho de modelagem apresentado foi realizado com o emprego do pacote de fluidodinâmica computacional denominado CFX®, o qual é baseado no método de volumes finitos, empregando técnicas *multigrid* para a solução de sistemas de equações algébricas, com aglomeração tipo algébrica e método de solução de Gauss-Sidel. São feitas comparações dos resultados obtidos com a metodologia ora apresentada com aqueles obtidos por sistemas específicos de simulação, demonstrando a aplicabilidade da abordagem de fluidodinâmica computacional para a modelagem ambiental.

Palavras-Chave: modelagem ambiental, fluidodinâmica computacional, cascalhos de perfuração

Abstract – This work presents a new methodology for the numerical simulation of discharge drilling cuttings of deep water oil exploration and production activities using a computational fluid dynamics (CFD) tool. Three-dimensional simulations are presented to evaluate the fate of drilling cuttings, the major wastes of deep water oil activities. The modeling work presented here was carried on with the aid of a computational fluid dynamics package called CFX®, which is based on the finite volume method, using the multigrid technique for the solution of systems of equations with algebraic agglomeration and Gauss-Sidel solution method. Comparisons of the results provided by this methodology and those obtained by computational specific systems are made, demonstrating the applicability of computational fluid dynamics tools to environmental modeling.

Keywords: environmental modeling, computational fluid dynamics, drilling cuttings

1. Introdução

A sustentabilidade é um aspecto que, de fato, deve estar contemplado em todos os projetos de empreendimentos na atualidade, sobretudo no que respeita a atividades de reconhecido impacto ambiental como as de exploração e produção de petróleo. Isto decerto será um desafio doravante, haja vista a dificuldade de manter o equilíbrio entre as incontestes necessidades de preservação do meio ambiente e de promoção do crescimento da oferta de recursos, entre eles destacando-se a energia, cujo principal insumo ainda é o petróleo.

Neste contexto, a atividade petrolífera é desenvolvida em condições cada vez mais restritivas do ponto de vista ambiental, sendo incessantes os estudos e investimentos em busca da sustentabilidade. Não obstante, o impacto ambiental da atividade é inevitável, haja vista que, notadamente no caso brasileiro, as dificuldades de prospecção e exploração são crescentes, bastando-se citar que novos empreendimentos estão sendo projetados para perfuração de poços em lâminas d'água de até 2000 m.

Dentre os rejeitos produzidos pela atividade de exploração de poços de petróleo, dois merecem destaque em razão da sua importância como agentes poluentes, quais sejam, o denominado cascalho de perfuração, gerado em razão da perfuração do solo em busca dos reservatórios de petróleo, e a chamada água de produção, derivada da atividade de produção e resultante, dentre outras coisas, de tratamentos preliminares efetuados sobre o óleo bruto. A tabela 1, adaptada de ENGELHARDT, 1994, evidencia algumas quantidades típicas de rejeitos geradas nas atividades de exploração e produção de petróleo no mar. O impacto potencial adverso de uma disposição inadequada de cascalhos e fluidos de perfuração pode incluir: (i) poluição do ambiente marinho; (ii) degradação da água e do solo superficial; (iii) contaminação do subsolo (KHONDAKER, 2000).

Atividade de Produção	Quantidades aproximadas (ton)
Poços Exploratórios	
Lama de perfuração- periodicamente	15-30
- global no final	150-400
Cascalho de perfuração – massa seca	200-1.000
Fluido base aderido sobre cascalhos	30-120
Poços de Produção	
Lama de perfuração- periodicamente	45.000
Cascalho de perfuração – massa seca	50.000
Água de produção	1.500 (por dia)

Tabela 1 - Quantidades típicas de rejeitos gerados pela atividade petrolífera no mar.

O processo de perfuração de poços de petróleo no leito oceânico envolve equipamentos de tecnologia avançada, com o emprego de máquinas perfuratrizes denominadas sondas que, utilizando fluidos especiais de perfuração, adentram o solo oceânico provocando o deslocamento de material sólido com granulometria diversa, ao que se denomina cascalho de perfuração. Os fluidos de perfuração caracterizam-se por propriedades físicas e químicas específicas que dependem de diferentes fatores ligados, por exemplo, ao tipo de formação, ao modo e ao planejamento da perfuração, à base da lama utilizada. A classificação de um fluido de perfuração é feita em função de sua composição. Embora ocorram divergências, o principal critério se baseia no constituinte principal da fase contínua ou dispersante. A natureza das fases dispersante e dispersa, bem como os componentes básicos da mistura e suas quantidades definem não apenas o fluido mas também as características e propriedades do descarte.

O processo de perfuração é normalmente dividido em etapas, de acordo com os requerimentos do sedimento a ser perfurado e conseqüentemente do tipo de fluido a ser empregado. As etapas mais críticas, normalmente aquelas que envolvem a perfuração das camadas mais profundas e mais consolidadas de sedimento, exigem o uso de fluidos de perfuração com características especiais que são, normalmente, de base não aquosa (óleo diesel, hidrocarbonetos sintéticos e outros). Estes constituintes de base não aquosa conferem maior toxicidade a este tipo de fluido, de modo que os cascalhos produzidos nesta fase precisam ser enviados à plataforma para um tratamento preliminar, em que o fluido de perfuração é separado para posterior reuso. Os cascalhos, ainda impregnados com fluido de perfuração, são então descartados a partir de tubulações a poucos metros da superfície. Esta fase é conhecida como fase com retorno.

Os critérios ambientais para o lançamento dos resíduos da atividade petrolífera acima abordados não são claramente definidos na legislação brasileira, sendo objeto de análise por parte dos órgãos ambientais por ocasião da etapa de licenciamento ambiental do empreendimento de exploração e produção, através da apreciação, dentre outras coisas, do estudo de impacto ambiental da proposição de atividade, que pode envolver a necessidade de modelagem computacional da destinação dos poluentes descartados.

O emprego de métodos computacionais de última geração pode permitir o cálculo mais adequado e completo das equações matemáticas que representam os fenômenos físicos relacionados ao transporte de resíduos lançados no ambiente marinho, sendo importante fator na busca de soluções mais precisas para estes problemas, servindo tanto aos interesses do setor industrial quanto aqueles dos órgãos governamentais, pela inserção de maior confiabilidade às predições efetuadas pelos modelos.

A maioria dos modelos de transporte de sedimentos disponíveis considera a fase de dispersão passiva juntamente com outro processo prevalecente. Não há até o presente momento um modelo universal e validado para a descarga de rejeitos de perfuração. Isto se deve ao fato de que a acurácia dos modelos de transporte baseia-se no conhecimento adquirido com relação aos processos relacionados com o transporte de lama de perfuração, os quais são apenas parcialmente compreendidos. Muitos dos modelos disponíveis foram desenvolvidos com conceitos simplificados e com poucos testes com dados reais. Como metodologia alternativa para a abordagem de problemas de transporte de contaminantes, CHOW e YIN (2004) empregaram ferramentas de fluidodinâmica computacional (CFD) para simulação do transporte de poluentes na atmosfera, tendo evidenciado que esta metodologia pode ser aplicada com sucesso na modelagem de descargas ambientais. Em princípio, a abordagem de CFD permite evitar as inúmeras simplificações normalmente adotadas pelos modelos algébricos normalmente utilizados na modelagem ambiental.

2. Metodologia

Empregou-se no presente trabalho uma abordagem tridimensional do problema de transporte de cascalho de perfuração, com método de discretização das equações de fluxo por Volumes Finitos, utilizando o pacote comercial CFX® (ANSYS, 2004a) e adotando seus modelos de interação entre as fases dispersa e contínua. A questão do fechamento turbulento foi resolvida através do modelo denominado $k-\epsilon$ (ANSYS, 2004b).

2.1. Equações Governantes

Grande parte dos problemas práticos de escoamento pode ser representada matematicamente pelas chamadas equações de Navier-Stokes, que envolvem a conservação de quantidade de movimento, associadas às equações de conservação da massa e à equação de conservação de energia. Como estes problemas são, via-de-regra, de natureza turbulenta, equações adicionais precisam ser contempladas.

O pacote CFX® contempla a solução numérica destas equações na sua forma discreta, isto é, para um número finito de pontos de uma grade escolhida para representação do domínio real. O pacote emprega o Método de Gauss-Sidel para a solução dos sistemas de equações lineares gerados no processo de discretização das equações governantes. Este método é combinado com um esquema de aglomeração algébrica, de acordo com uma sistemática denominada de ACM (*Additive Correction Multigrid*), que visa acelerar a convergência da solução (ANSYS, 2004a).

A modelagem de lançamento de cascalho trata-se de um problema de escoamento multifásico, em que a fase contínua é constituída pela água do mar (ambiente receptor) e a fase dispersa, o cascalho, de acordo com a sua distribuição granulométrica. No presente estudo, foi empregado um modelo Euleriano-Lagrangeano em que a fase contínua é tratada como Euleriana e a fase dispersa, como constituída de partículas Lagrangeanas.

2.2. Definição do problema

Neste trabalho é apresentada a simulação do lançamento de cascalho proveniente do poço Eagle, de acordo com os dados obtidos junto ao projeto MAPEM (FREITAS, 2004). Todo o processo de simulação numérica incluindo a construção da geometria, o pré-processamento, o pós-processamento e a visualização foi feito através dos módulos do pacote CFX®. Esta modelagem é comparada com a publicada no relatório do Projeto MAPEM (FREITAS, 2004), realizada com o aplicativo Offshore Operators Committee Mud and Produced Water Discharge Model (OOC) (BRANDSMA e SMITH, 1999).

Apresentamos neste trabalho a modelagem da segunda e da terceira fases da perfuração do poço Eagle, feitas com o emprego de fluidos de perfuração de base aquosa e não aquosa, respectivamente. Os rejeitos gerados na fase com fluido base aquosa foram descartados diretamente e próximo ao leito oceânico; os demais foram carreados para a plataforma para separação do fluido aderido e posterior descarte no ambiente marinho, a partir de uma tubulação com 11" de diâmetro, com o bocal de descarga localizado 13 m abaixo da superfície do mar.

2.3. Domínio

A simulação do lançamento de cascalho do poço Eagle foi feita considerando um domínio $\Omega = [1000 \times 1000 \times 912] \subset \mathcal{R}^3$, com fronteira Γ e definido num intervalo de tempo $[0, T] \in \mathcal{R}^+$, de acordo com a profundidade média local e com a perspectiva de impacto do lançamento, restrita a um raio de 500 m a partir do ponto de descarte. As paredes laterais são consideradas aberturas, isto é, com fluxo livre, sendo suas velocidades prescritas inicialmente, de acordo com as condições medidas para o local à época do lançamento (FREITAS, 2004). Foi empregada nas simulações uma malha de discretização tetraédrica e não estruturada, com 88.434 nós, escolhida após vários estudos que permitiram estabelecer um refinamento na porção do domínio em torno dos pontos de descarte de material e evitar o custo computacional relacionado ao refinamento generalizado.

3. Apresentação e Análise dos Resultados

As Figuras 1 e 2 representam as estimativas dos totais acumulados no fundo, relativas à modelagem do lançamento de cascalhos gerados nas duas fases contempladas neste estudo.

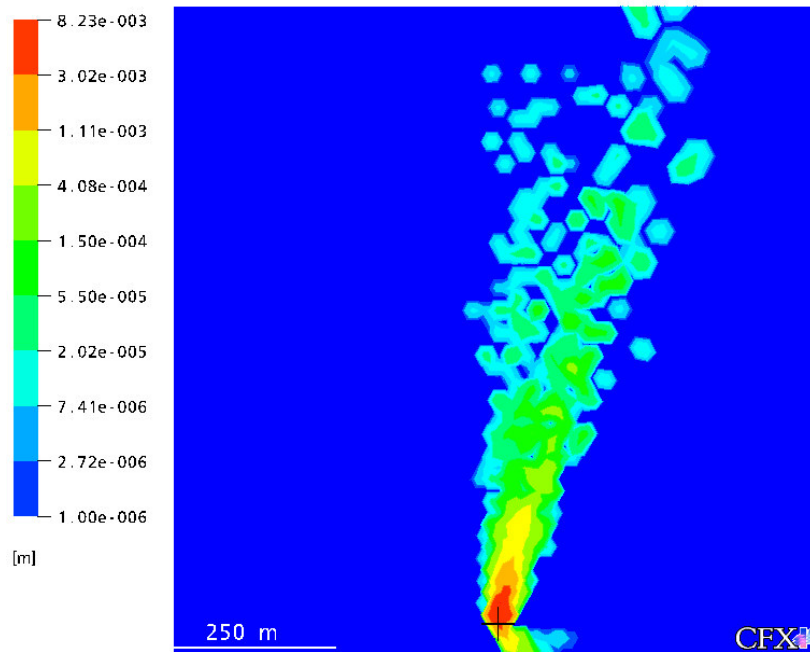


Figura 1 - Perfuração com fluido de base aquosa – acumulação no fundo

O máximo valor de espessura acumulada esperado na fase de perfuração com fluido de perfuração de base aquosa foi estimado em 8,2 mm, de acordo com a Figura 1, estando dentro da mesma ordem de grandeza do valor obtido no projeto MAPEM (FREITAS, 2004), que foi de 11,1 mm, com o uso do modelo OOC. Esta diferença era esperada, haja vista que o modelo OOC tende a ser mais conservativo, face às simplificações adotadas em seus cálculos. A área coberta com cascalho depositado com espessura superior a 0,1 cm é de 5.600 m², também compatível com aquela obtida na modelagem do projeto MAPEM (FREITAS, 2004), de 11.300 m².

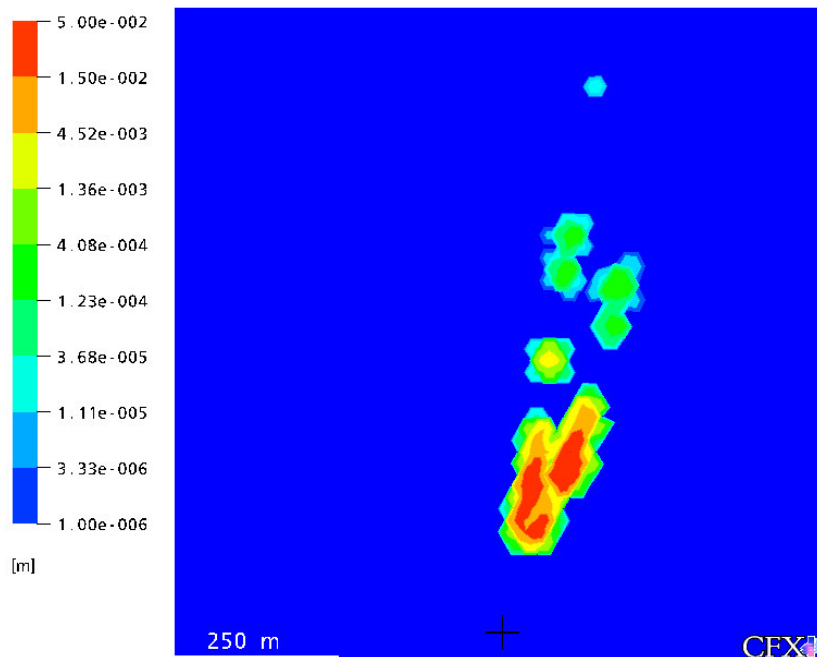


Figura 2 - Perfuração com fluido de base não aquosa - acumulação no fundo

O máximo valor de espessura acumulada esperado na fase de perfuração com fluido de perfuração de base não aquosa é de 5,0 cm, de acordo com a figura 2, estando uma ordem de grandeza acima do valor obtido no projeto MAPEM (FREITAS, 2004) que foi de 0,76 cm, com o uso do modelo OOC. A área coberta com cascalho depositado com espessura superior a 0,1 cm, entretanto, foi estimada em 30.733,1 m², em contraste com aquela obtida no projeto MAPEM (FREITAS, 2004) com o uso do modelo OOC, de 82.000 m². Esta diferença evidencia a necessidade de ajuste de parâmetros relacionados com dispersão, tanto em um modelo quanto em outro.

Nas figuras 3 e 4 são exibidas as trajetórias de partículas para a etapa de perfuração empregando fluidos de base aquosa e não aquosa, respectivamente. Pode-se notar o efeito da dispersão turbulenta atuando sobre as partículas, sobretudo aquelas de menor tamanho.

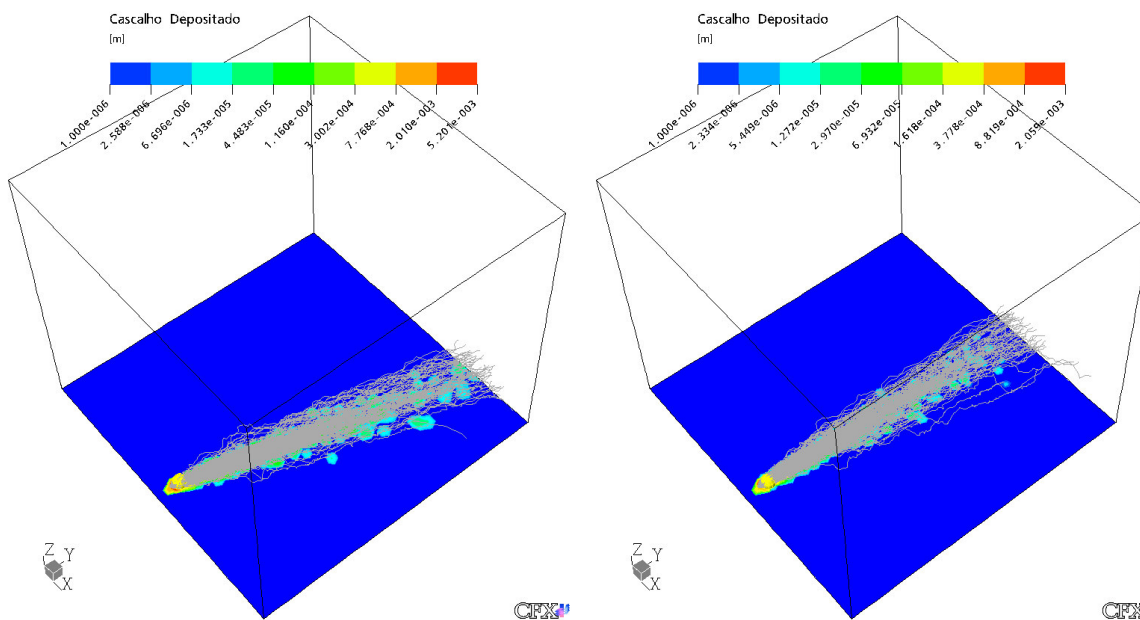


Figura 3 - Perfuração com fluido base aquosa – trajetórias de partículas

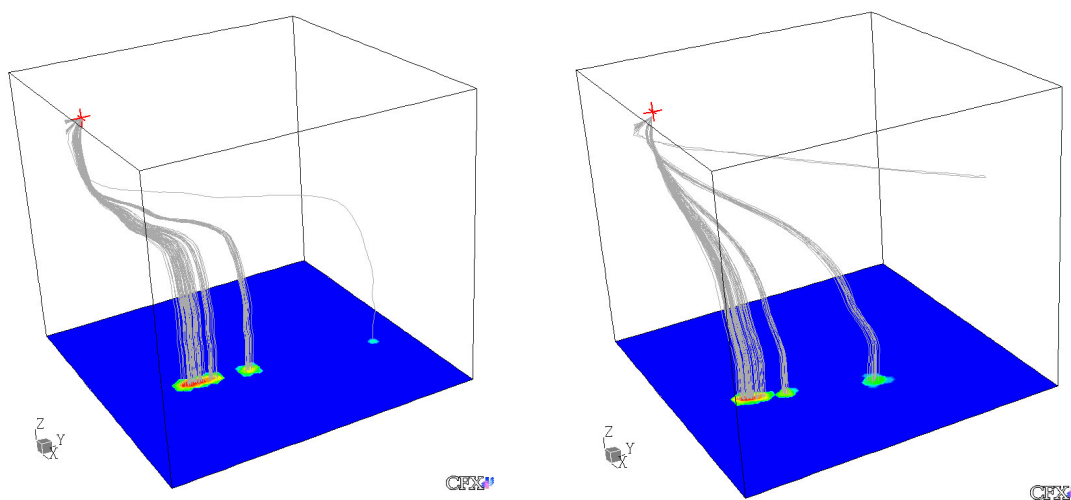


Figura 4 - Perfuração com fluido de base não aquosa – trajetórias de partículas

3. Conclusões

De maneira geral, pôde-se observar que os resultados obtidos no presente trabalho são compatíveis com aqueles obtidos nas simulações realizadas com o modelo específico, o OOC. Isto evidencia a aplicabilidade da ferramenta genérica de fluidodinâmica computacional para a modelagem ambiental de lançamento de rejeitos das atividades da indústria petrolífera em mar aberto. Os bons resultados comparativos, ainda que principalmente qualitativos, corroboram esta conclusão.

A abordagem de fluidodinâmica computacional permite o cálculo efetivo do transporte de contaminantes como resultado da solução do escoamento da fase contínua, permitindo que sejam evitadas as inúmeras simplificações que constituem os modelos mais amplamente empregados na modelagem ambiental. O uso de modelos simplificados sempre esteve associado às limitações computacionais, em razão das grandes dimensões normalmente envolvidas nos problemas de modelagem ambiental. A grande evolução do aparato computacional e a conseqüente redução dos custos, entretanto, propiciaram o desenvolvimento e a aplicação de métodos computacionais mais robustos em problemas de domínios notadamente mais complexos como os ambientais.

No que tange à Engenharia Ambiental, os resultados aqui apresentados são bastante satisfatórios, uma vez que se obteve resultados similares àqueles obtidos com a aplicação de modelos específicos através do emprego de uma ferramenta de CFD, onde as partículas dos sedimentos descartados têm sua destinação calculada com base na solução do escoamento propriamente dito. Este aspecto é de notória importância no que respeita à acurácia dos resultados e, por conseguinte, à confiabilidade dos relatórios ambientais, servindo aos propósitos das corporações responsáveis pelos descartes de rejeitos, bem como dos órgãos ambientais reguladores da atividade de exploração e produção de petróleo em águas profundas.

No presente estudo não foram empregadas funcionalidades disponíveis da ferramenta de fluidodinâmica utilizada, como por exemplo, a malha adaptativa, a possibilidade de inserção de campos tridimensionais de corrente, a possibilidade de uso de funções periódicas para as correntes, entre outras. Esta escolha se deu em razão de um dos objetivos do estudo acerca da comparação das simulações com aquelas realizadas com o aplicativo específico, havendo necessidade de reproduzir as mesmas condições de realização destas. Desta forma, os estudos aqui apresentados podem ser ampliados e otimizados a partir do emprego de técnicas numéricas complementares já disponíveis e, principalmente, através da paralelização do trabalho computacional correlato, permitindo a modelagem de domínios mais complexos e mais realísticos, com a robustez e a precisão da abordagem de fluidodinâmica computacional.

4. Agradecimentos

À PETROBRAS pela oportunidade de realização deste trabalho e pela disponibilidade dos recursos materiais, em especial ao E&P-CORP/SMS pelo incentivo para acompanhamento do projeto MAPEM e abertura de frentes de pesquisa na área de modelagem de cascalho.

À UFRGS/IG/CECO pela cessão dos dados relativos à operação de perfuração do Poço Eagle empregados no projeto MAPEM, imprescindíveis para a modelagem de lançamento de cascalho inserida no contexto deste estudo.

Ao Programa de Engenharia Civil da Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro pelo apoio no desenvolvimento da modelagem e pelas valiosas contribuições em todas as fases do estudo.

5. Referências

- BRANDSMA, M. G.; SMITH, J.P. Offshore Operators Committee Mud and Produced Water Discharge Model – Report and User Guide. Exxon Mobil Production Operations Division. Relatório, EPR.29PR.99, 168 p, 1999.
- CFX5_SOLVER_MODELS, “User Manual”, ANSYS, 2004a.
- CFX5_SOLVER_TEORY, “User Manual”, ANSYS, 2004b.
- CHOW, W. K., YIN, R., “A new model on simulating smoke transport with computational fluid dynamics”, *Building and Environment*, n. 39, pp. 611 – 620, 2004.
- ENGELHARDT, E R., Limitations and Innovations in the Control of Environmental Impacts from Petroleum Industry Activities in the Arctic, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 29, Nos 6-12, pp. 334-341, 1994
- FREITAS, C. M. S., PIVEL, M. A. G., COMBA, J. L. D., BINOTTO, A. D., D’AQUINO, C., COAN, S., J. A., *Modelagem do descarte de cascalhos e fluido de perfuração*. In: Relatório MAPEM I: Monitoramento Ambiental em Atividades de Perfuração Exploratória Marítima – Poço Raso, Centro de Estudos Costeiros, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, XX p., 2004
- KHONDAKER, A.N. “Modeling the fate of drilling waste in marine environment - an overview”, *Computers & Geosciences*, n. 26, pp. 531-540, 2000.