



Secretaria de
Educação Profissional
e Tecnológica

Ministério da
Educação



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
MODALIDADE PROFISSIONAL**

**MODELAGEM COMPUTACIONAL TRIDIMENSIONAL DO DESCARTE DE
RESÍDUOS DE FLUIDOS COMPLEMENTARES DE CIMENTAÇÃO DE POÇOS DE
PETRÓLEO**

WILKER MARCOLONGO VIEIRA DA SILVEIRA

MACAÉ/RJ

2016

WILKER MARCOLONGO VIEIRA DA SILVEIRA

**MODELAGEM COMPUTACIONAL TRIDIMENSIONAL DO DESCARTE DE
RESÍDUOS DE FLUIDOS COMPLEMENTARES DE CIMENTAÇÃO DE POÇOS DE
PETRÓLEO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental, linha de pesquisa Avaliação, Gestão e conservação Ambiental.

Orientador: D.Sc. Jader Lugon Junior – **IFF**
(Doutor em Modelagem Computacional –
IPRJ/UERJ)

MACAÉ/RJ

2016

Dissertação intitulada Modelagem Computacional Tridimensional do Descarte de Resíduos de Fluidos Complementares de Cimentação de Poços de Petróleo, elaborada por Wilker Marco-longo Vieira da Silveira e apresentada publicamente perante a Banca Examinadora, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, na linha de pesquisa Avaliação, Gestão e Conservação Ambiental e área temática de Avaliação Ambiental e Geotecnologias do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Fluminense.

Aprovada em 23/11/2016

Banca Examinadora:

.....
Jader Lugon Junior - Orientador
Doutor em Modelagem Computacional / UERJ
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense

.....
Maria Inês Paes Ferreira
Pós-doutora em manejo integrado dos recursos naturais
Vancouver – Island University - Canadá
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense

.....
Pedro Paulo Gomes Watts Rodrigues
Doutor pela School of Marine Science and Technology – Newcastle University (Inglaterra)
Professor da Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S587m

Silveira, Wilker Marcolongo Vieira da.

Modelagem computacional tridimensional do descarte de resíduos de fluidos complementares de cimentação de poços de petróleo/ Wilker Marcolongo Vieira da Silveira. – Macaé, RJ, 2016.

48 f.: il. color.

Orientador: Jader Lugon Junior.

Dissertação (Mestrado). – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Macaé, RJ, 2016.

Inclui bibliografia.

1. Perfuração de poços - Brasil. 2. Poços de petróleo - Cimentação. 3. Revestimentos - Processos. 4. Perfuração de poços - Eliminação de resíduos. 5. MOHID (Programa de Computador). 6. Simulação - Computadores. I. Lugon Junior, Jader, orient. II. Título.

CDD 622.33819

23.ed.

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO CIENTÍFICO 1

Figura 1 – Circulação do fluido de perfuração durante a perfuração.	7
Figura 2 - Esquema geral das fases da perfuração de um poço de óleo e gás.	7
Figura 3– Poço exibindo os tipos de revestimento.....	15
Figura 4 – Perfuração com fluido aquoso	21
Figura 5 - Perfuração com fluido não aquoso.	22
Figura 6 - Espessura do cascalho aderido a fluido aquoso acumulado no leito marinho	22
Figura 7 – Espessura do cascalho aderido a fluido não aquoso acumulado no leito marinho.....	23
Figura 8 - Estimativas dos totais de cascalho aderido a fluido base aquosa (A) e a fluido base não aquosa (B) acumulados no fundo.	23

ARTIGO CIENTÍFICO 2

Figura 1 – Esquema de tratamento do volume morto de colchão espaçador.	32
Figura 2 – Unidade de “batch mixer” para misturas para operação de cimentação.....	33
Figura 3 – Caixas de contenção para armazenamento e transporte de resíduos de cimentação.	34
Figura 4 - Terreno digital da região estudada (MOHID STUDIO).	40
Figura 5 - Vista lateral da área onde será feita a simulação	
Figura 6 - Vista MOHID GIS e MOHID STUDIO 200m – Partículas acomodadas no fundo oceânico	41
Figura 7 - Vista MOHID GIS e MOHID STUDIO 1000m – Partículas acomodadas no fundo oceânico.....	42
Figura 8 – Vista MOHID GIS e MOHID STUDIO 2000m – Partículas acomodadas no fundo oceânico.....	42

LISTA DE QUADROS

ARTIGO CIENTÍFICO 1

Quadro 1 - Definições de tipos de fluidos	5
Quadro 2 - Resíduos da Operação de Perfuração	5
Quadro 3 - Quantidades típicas de rejeitos gerados pela atividade petrolífera no mar..	11
Quadro 4 - Critérios para descarte de fluidos de perfuração.....	18
Quadro 5 - Critérios para descarte de cascalho associado a fluidos de perfuração.....	18

ARTIGO CIENTÍFICO 2

Quadro 1 - Condições para descarte de colchão espaçador.....	32
Quadro 2 - Volume morto de espaçador gerado após as fases de cimentação de um poço	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D – Duas dimensões

3D – Três dimensões

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CGPEG – Coordenação-Geral de Petróleo e Gás

CL50 – Concentração do efluente que causa efeito agudo (letalidade ou imobilidade) a 50%
dos organismos

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

DILIC – Diretoria de Licenciamento Ambiental

FPS – Fração Particulada Suspensa

MOHID - *Modeling Hydrodynamic System*

NT – Norma Técnica

PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, pois se não fosse da vontade dele, nada aconteceria.

A minha esposa Érica e meus filhos Maria Luisa e Wilker Filho que me deram forças para que eu finalizasse mais essa etapa em minha vida.

Aos meus pais Erivelton e Gilda e irmãos Pablício e Rudson que incentivaram para que eu finalizasse o mestrado.

Ao orientador Prof. Jader Lugon Júnior pelo total apoio dado e grande incentivo durante a pesquisa e sempre de prontidão para ajudar no que fosse preciso.

A minha chefe Vanessa da Silva Barcelos que me apoiou e fez com que eu conseguisse frequentar as aulas dividindo o meu tempo com o trabalho.

A querida amiga Letícia Ferrazo pelo apoio recebido desde a inscrição, e durante todo o mestrado, dando um grande apoio para que finalizasse o projeto.

A querida amiga Helga Giovanna pelas inúmeras vezes em que fui socorrido por você e pelo grande apoio na reta final do processo.

Ao querido amigo Pedro Paiva que muito ajudou com as simulações finais para o projeto.

Aos queridos amigos do programa do mestrado Edmílson, Saulo, Ramon Petrilho, Sabrina, Stenio e Villas Boas por terem participado dessa etapa tão engrandecedora para minha vida.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense - IFF pela oportunidade e pelo crescimento profissional proporcionados.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE QUADROS	vii
APRESENTAÇÃO	1
DESENVOLVIMENTO	3
ARTIGO CIENTÍFICO 1	3
Resumo	3
Abstract	3
Revisão da literatura	4
Operação de Perfuração	6
Resíduos gerados durante a operação de perfuração	9
Definição dos fluidos de perfuração	12
Principais funções e propriedades dos fluidos de perfuração	12
Operação de revestimento e cimentação	14
Potencial de danos dos resíduos descartados em mar aberto	17
Conclusão	24
Referências Bibliográficas	25
ARTIGO CIENTÍFICO 2	30
Resumo	30
Abstract	30
Introdução	31
Metodologia	37
Resultados e Discussão	39
Conclusão	43
Referências Bibliográficas	44

APRESENTAÇÃO

A atividade de exploração e produção de petróleo compreende as etapas de pesquisa, perfuração e produção. Na etapa de pesquisa é realizada a sísmica, que consiste na primeira fase da busca por petróleo, que aponta as regiões de alta probabilidade de ocorrência de hidrocarbonetos através de pesquisas geológicas e geofísicas, selecionando uma região para ser perfurada. O poço de petróleo é a forma de se ligar o reservatório de óleo ou gás com a superfície e assim proceder à extração dos mesmos (SCHAFFEL, 2012).

Um poço de petróleo é perfurado em várias fases, nas quais fluidos de perfuração são bombeados a pressão elevada a fim de que ocorra o transporte de cascalhos até a superfície, para manter a estabilidade das pressões do poço localizado entre o revestimento e a formação rochosa, ou seja, o espaço é preenchido com cimento, sendo essa operação é denominada cimentação. A cimentação garantirá a estabilidade mecânica do poço, bem como o isolamento entre as zonas produtoras de óleo e as formações adjacentes. O principal cimento utilizado hoje pelas companhias petrolíferas brasileiras é o cimento Portland[®], classe G ou H. (Campos, 2015).

Na exploração do petróleo, o uso de fluidos de perfuração é essencial para o equilíbrio da pressão entre as formações e o interior do poço, além de impedir o refluxo do reservatório de petróleo ao poço. Os fluidos também são responsáveis pela elevação dos cascalhos de perfuração à superfície, entretanto, estes podem ser potenciais contaminantes do ambiente, uma vez que chegam à superfície impregnados de fluidos (Campos, 2015).

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 mitigação dos impactos ambientais negativos, os quais são inevitáveis, tendo em vista a expressiva dificuldade de se perfurar em maiores profundidades e levando em consideração o pré-sal, onde a operação ainda é mais demorada e demanda maior complexidade no contexto geral.

No último século, a poluição da água pelos efluentes das atividades industriais e agrícolas afetou sobremaneira todos os tipos de fontes de água, variando desde aquíferos subterrâneos até os oceanos. Podemos citar como exemplo a contaminação pela descarga de esgotos e outros materiais tóxicos no ambiente marinho, descarga de resíduos radioativos em

águas costeiras, vazamentos de óleos em navios, descarga de fertilizantes, outros químicos em cursos d'água e liberação de grandes quantidades de rejeitos da indústria petrolífera, sobretudo em mar aberto no caso brasileiro (SCHAFFEL 2012).

Ná prática, os resíduos tem que ser transportados para a terra para a destinação final e esta operação apresenta grande dificuldade logística, além de altos custos econômicos e ambientais. As previsões feitas por modelagem computacional podem estimar o impacto ambiental, ajudando a definir uma possível área impactada com a acumulação da parte sólida do fluido.

O objetivo do estudo foi avaliar se a aplicação de modelagem computacional é válida para a auxiliar a mensuração do impacto dos resíduos de colchão espaçador no leito marinho. O colchão espaçador é um fluido complementar que é constituído basicamente por agente adensante (Geralmente usado o sulfato de bário), uma estendedor (geralmente bentonita ou outro químico com a mesma propriedade) para manter as partículas suspensas, antiespumante e surfactante (somente necessário se no poço for utilizado fluido não aquoso, devido as propriedades de remoção desse fluido da parede do poço, que é a sua principal função).

DESENVOLVIMENTO

ARTIGO CIENTÍFICO 1

Estudo da geração de resíduos nas operações de perfuração durante a construção de poços marítimos de petróleo e gás

Resumo

No trabalho é feita uma descrição detalhada das operações envolvidas na perfuração e exploração de um poço de petróleo e gás e a discussão da possibilidade do descarte de fluido de perfuração em uma área específica em torno de uma plataforma, conforme procedimentos descritos na minuta do IBAMA de 2014, órgão ambiental que regulamenta o descarte de resíduos. Na minuta são especificadas as classes de fluidos e parâmetros ambientais, pois dependendo da caracterização desse resíduo tem-se opções de retorno do mesmo para terra com posterior tratamento e destinação final ou do descarte em alto mar. O descarte dos resíduos oriundos das atividades de perfuração e cimentação durante a exploração de poços de petróleo e gás foi analisado para estimar a área de dispersão, levando-se em consideração correntes marítimas, temperatura e profundidade e seus efeitos sobre a flora e fauna marítima.

Palavras-chave: Cimentação de poços de petróleo; Perfuração de poços de petróleo; Cimentação de poços de petróleo; Ambiente marinho; Descarte de resíduos.

Abstract

This work contains a detailed description of operations involved in drilling and exploration of an oil and gas wells and the increasing discussion of the possibility of a drilling fluid disposal in a specific area around a platform taking into account the draft IBAMA 2014, regulations proposed by Brazilian Environmental Control Institute, IBAMA which makes regulations for the disposal of waste. The governmental technical instructions are still in draft and specifies fluids classes and other environmental parameters depending on the characterization of this waste has are closed options for land, later treatment and disposal or disposal at sea. The waste generation

coming of drilling and cementing during the exploration of oil and gas wells. Disposal of waste from drilling activities and cementing during the exploration of oil and gas wells were analyzed in order to estimate the dispersion area, taking into account ocean currents, temperature and depth, but also effects on the marine fauna and flora.

Keywords: Cementing fluids; Drilling fluids; Marine environment; Waste disposal.

Revisão da literatura

O processo de construção de poços de petróleo e gás gera uma variedade de tipos de resíduos. Alguns desses resíduos são subprodutos naturais associados a perfuração de formação geológica, como por exemplo os cascalhos de perfuração, e alguns vêm de materiais utilizados para perfurar o poço, por exemplo, o fluido de perfuração não reutilizável (REIS, 1996a).

O Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA elaborou a Nota Técnica (NT) N° XXX/2014/CGPEG/DILIC/IBAMA devido à necessidade de reformulação dos procedimentos para a regulação do uso e do descarte de fluidos, de cascalhos gerados de fluidos complementares durante a atividade de perfuração marítima de poços de exploração e produção de petróleo e gás. Na minuta foram apresentadas novas orientações e dentre elas os requisitos para uso e descarte de todos esses resíduos gerados.

Na Resolução CONAMA n° 237, está descrito que a fiscalização e o licenciamento ambiental dos empreendimentos marítimos de exploração e produção de petróleo e gás é de responsabilidade do IBAMA e a divisão interna do órgão, DILIC (Diretoria de Licenciamento Ambiental), por meio da Coordenação-Geral de Petróleo e Gás (CGPEG), é a responsável pelo licenciamento ambiental dentro do IBAMA (GAMA, 2014; POLLIS, 2008). As novas diretrizes implicam em alteração na gestão responsável por parte das empresas, por meio do controle de diversos fatores, eles o monitoramento contínuo de todas as fases de operação na sonda e as restrições de descarte de efluentes, baseadas na toxicidade e a presença de contaminantes a partir de avaliação feita pela empresa no momento da operação. Um resumo das categorias de fluidos e resíduos utilizados nas operações e descritos na NT é apresentado nos

Quadros 1 e 2, respectivamente.

Quadro 1 - Definições de tipos de fluidos

Definições de tipos de fluidos	
Fluidos de Perfuração	Formulações utilizadas na perfuração de poços para promover a remoção do cascalho gerado, resfriar e lubrificar broca e coluna, e manter equilibradas as pressões de subsuperfície.
Fluidos Complementares	Denominação genérica dada a todos os demais fluidos utilizados durante a perfuração, cimentação e completação de poços.

Fonte: Adaptação Brasil (2014).

No Quadro 2 apresenta os resíduos gerados nas operações de perfuração de poços de petróleo e gás e seus volumes residuais.

Quadro 2 - Resíduos da Operação de Perfuração

Operação	Resíduo	Descrição
Perfuração	Fluidos de Perfuração	Volume não reaproveitável de fluido de perfuração de base aquosa (FPBA) e de base não aquosa (FPBNA).
	Fluidos Complementares	Volume não reaproveitável de fluido complementar de base aquosa (FCBA) e de base não aquosa (FCBNA).
	Cascalhos	Cascalhos associados ao fluido de perfuração de base aquosa (cascalhos + FPBA) e ao fluido de base não aquosa (cascalhos + FPBNA).

Fonte: Adaptação Brasil (2014).

A NT proibiria o descarte no mar de fluidos de perfuração e complementares de base não-aquosa, efluentes gerados a partir da limpeza dos tanques de cimentação (Água de lavagem) e pasta de cimento excedente nos tanques da unidade de perfuração. O apreçada um nd para os demais resíduos, mas respeitando determinadas exigências IBAMA 2014..

“O descarte de fluidos de perfuração de base aquosa, bem como do cascalho associado, durante as fases com retorno a plataforma, será permitido se não for detectada a presença de óleo livre, através do Teste de Iridescência Estática em amostra coletada em momento pré-descarte, conforme descrito em “Analytic Methods for the Oil and Gas Extraction Point Source Category. U.S. EPA” (Dezembro, 2011).” Brasil (2014).

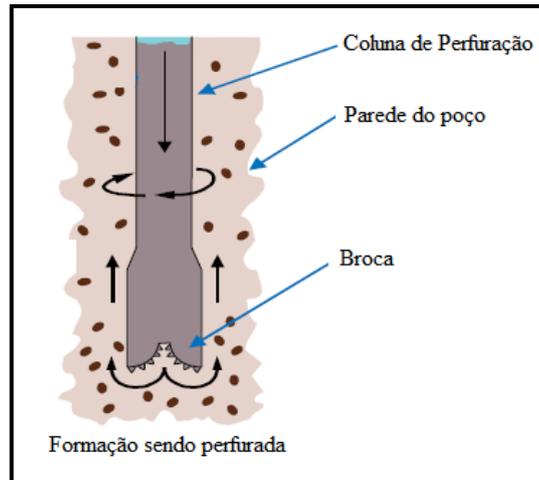
*“Não será permitido o descarte em águas marinhas, de cascalho e fluidos de perfuração de base aquosa, cujo resultado da CL50-96h, pelos métodos NBR 15308 e NBR 15469, realizado com amostra de fluido coletada no momento pre-descarte, for inferior a 30.000ppm da FPS.” Nota Técnica CGPEG/DILIC/IBAMA No XXX/2014.
IBAMA (2014)*

O presente estudo apresenta feitas uma revisão bibliográfica e uma breve descrição das atividades de perfuração e cimentação de poços, focando na geração de volumes residuais em cada etapa. Discute-se ainda sobre a viabilidade de mensurar o impacto dos fenômenos físicos que podem ocorrer com o descarte em mar aberto de um dos resíduos da cimentação, verificando suas características de dispersão e advecção.

Operação de Perfuração

Na etapa de perfuração de um poço de petróleo, a rocha é perfurada pela ação de rotação e peso aplicados a uma broca existente na extremidade de uma coluna de perfuração (THOMAS, 2001). Schaffel (2002) descreve a perfuração rotativa como uma torre de perfuração apoiada sobre uma superestrutura, onde se localiza a mesa rotativa. Esta mesa sustenta e comunica torque à coluna de perfuração, formada por diversos tubos conectados entre si com uma broca em sua extremidade, que vai perfurando as rochas em direção aos potenciais reservatórios. Os tubos serão conectados à medida que a broca se aprofunda. Durante a perfuração a broca lança um fluido que circula pelo poço voltando à superfície através do espaço anular entre a coluna de perfuração e a parede de poço. O fluido é denominado lama ou fluido de perfuração.

Figura 1 – Circulação do fluido de perfuração durante a perfuração.



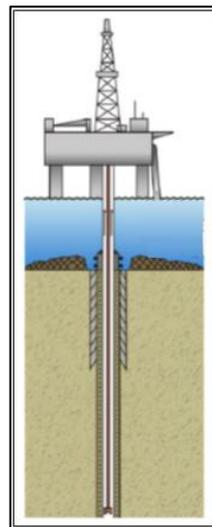
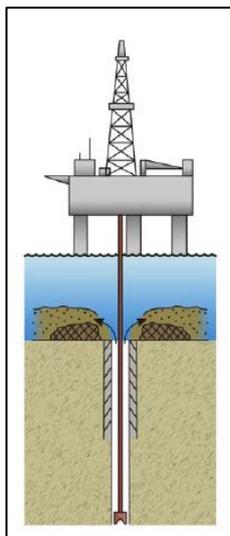
Fonte: Adaptação de OGP (2003).

A Figura 2 (a) ilustra a perfuração sem *riser*, tubo condutor de grande diâmetro que estabelece um meio de comunicação entre o poço e a plataforma na superfície. Os fragmentos de rocha triturada são lançados em um fluxo ascendente diretamente para o assoalho oceânico se acumulando no entorno do poço. Após a instalação do *riser*, Figura 2 (b), os cascalhos chegam à superfície da unidade marítima junto com o fluido de perfuração (VEIGA, 2010)

Figura 2 - Esquema geral das fases da perfuração de um poço de óleo e gás.

(a) Fase de perfuração sem *riser*.

(b) Fase de perfuração com *riser*.



Fonte: VEIGA (2010).

Na produção de petróleo, os fluidos de perfuração são de uma importância ímpar. É deles o papel de resfriar a broca, de retirar dos cascalhos gerados na perfuração, de manter a pressão hidrostática do poço para garantir a sua integridade e de conter o cascalho enquanto ocorre as paradas de uma coluna de perfuração para alguma operação intermediária e conseguir quebrar esse gel, sem comprometer a formação ou causar perturbações no espaço anular, graças a materiais poliméricos contidos em sua formulação, que promovem alterações de viscosidade do tipo sol-gel (SCHAFFEL, 2002)

A maioria desses fluidos de perfuração agregam constituintes que em maior ou menor grau, tem características perigosas (tóxicas, corrosivas ou mesmo agressivas ao meio ambiente), mas também tem características boas como, por exemplo, retardar a formação de hidrato, sendo denominadas assim de inibidores de formação de hidratos (VEIGA, 2010).

A operação é extremamente dependente do tipo do fluido de perfuração que será utilizado. O custo de toda operação também está diretamente ligado ao fluido, embora o custo do fluido em si não seja necessariamente tão alto, dependendo das propriedades de lubrificação durante a operação pode elevar esse valor, sendo proporcional ao número de dias necessários para alcançar a profundidade desejada e solucionar problemas operacionais. (CAENN *et al*, 2011a).

Veiga (2010) classificou os fluidos de perfuração em 2 tipos principais: fluidos de base aquosa (FBA) e fluidos de base não aquosa (FBNA). Os fluidos aquosos têm em sua composição basicamente de 90% a 100% de água por volume, com a adição de componentes tais como sulfato de bário (ou barita), argila, lignosulfonatos, soda cáustica, polímeros e outros aditivos especiais. A água utilizada na formulação dos fluidos pode ser água industrial, água do mar ou soluções salinas saturadas. O poço em sua primeira fase, utiliza água como fluido de perfuração e em menor escala, mas podem também utilizar fluidos com formulações simplesmente com viscosificantes e alcalinizantes chamados de fluidos convencionais e que são de base água.

Apesar do preço do fluido de perfuração não aquoso ser mais alto do que o de base água, devido ao seu melhor desempenho, o primeiro ainda é mais vantajoso devido uma melhor resistência térmica e estabilidade química (KHONDAKER, 2000).

Resíduos gerados durante a operação de perfuração

A sustentabilidade tem que ser levada em conta em todos os empreendimentos hoje em dia. Na atividade de exploração e produção não é diferente, pois mesmo envolvendo muitas variáveis, regras ambientais precisam ser obedecidas. A grande dificuldade consiste em seguir as diretrizes ambientais paralelamente à imensa necessidade do mercado em gerar produtos cada vez mais rapidamente. A procura de fontes de energia renováveis é uma alternativa, mas a viabilidade de muitas fontes dessas ainda é questionado, pois com a larga exploração das reservas de petróleo já existentes e das que ainda serão descobertas (DIAS, 2005).

Devido às dificuldades de exploração dos poços de petróleo e gás em profundidades cada vez maiores e com lâminas d'água de até 2000 metros, o impacto ambiental parece não ser desprezível. Todas as operações de exploração e perfuração estão associados a impactos potenciais em severidade e probabilidade: risco de derrames de petróleo devido a ruptura de dutos, à descarga de rejeitos de perfuração (fluido de perfuração e cascalho) e água de produção, à geração de ruídos (ENGELHARDT, 1994)

Todo o material recolhido na sonda após os trabalhos (resíduos da perfuração) é encaminhado para o tratamento e desposo final em terra. Os resíduos seguem por transporte marítimo e quando são desembarcados são geralmente destinados a aterros industriais, após passarem por tratamento, cada tipo de resíduo tem um tratamento específico, o qual depende de sua composição do seu tipo e dos padrões da empresa de resíduos que gerencia o processo. Esse material pode também ser utilizado na fabricação de asfalto ou para a construção civil, após reciclagem (PIRES, 2009; REIS, 1996b).

Segundo Gama (2014), os principais rejeitos gerados durante a perfuração de poços são: fluidos gastos de base aquosa e não aquosa que não podem ser reutilizados e cascalhos associados ao fluido de perfuração de base aquosa e não aquosa. O cascalho é lançado ao mar antes da instalação do *riser* e contendo resíduos de fluidos de perfuração base aquosa, com composição simplificada para minimizar impacto ambiental à flora e fauna marinhas.

O fluido é circulado e retorna do poço pelo anular que é o espaço que se encontra entre o revestimento e a coluna de perfuração em operações com *riser*. O fluido é peneirado por uma série de peneiras para separá-lo do cascalho agregado durante a perfuração, passando posteriormente as etapas de desareiação, dessiltização e centrifugação, com a última é necessária caso ainda haja dificuldades, a separação. Segundo Veiga (2010), o fluido permanece ainda com partículas coloidais e argilas finas, mantendo assim suas propriedades normais.

Dependendo da natureza e dos resultados dos testes submetidos, as opções que se tem com os fluidos de perfuração são descarte no mar, reutilização ou disposição em tanques para tratamento em terra juntamente com os cascalhos oriundos da operação. Para seleção do método de descarte, leva-se em consideração a avaliação ambiental, os regulamentos locais e o custo/benefício da operação (CAMPOS, 2014).

A inutilização do fluido de base aquosa acontece quando o mesmo é diluído, quando há a decisão de troca de sistema para manobras específicas no poço e quando se chega ao final da operação. A reutilização do fluido pode ser feita em tratamento na sonda ou em terra, por seu fornecedor (AYRES JR.,1982).

A reutilização consiste na recuperação dos componentes do fluido logo após a conclusão da perfuração, visando a possível utilização em outros poços. O fluido pode ser recuperado em tratamento na sonda ou pode ser reencaminhado para o fornecedor desde que a infraestrutura necessária para sua recuperação esteja disponível em terra (CAMPOS, 2014).

A poluição marinha, contaminação de subsolo e a degradação da água e do solo superficial são impactos ambientais muito das vezes irreversíveis causados por uma disposição inadequada de fluidos de perfuração e cascalhos. Além do cascalho e do fluido de perfuração, há outro grande agente poluente que é extremamente significativo, chamado água de produção proveniente da produção e de tratamentos utilizados para a purificação do óleo bruto.

A tabela 1 feita sobre uma adaptação de Engelhardt (1994) mostra uma estimativa do volume de rejeitos típicos dos rejeitos gerados nas atividades de exploração de produção de petróleo no mar.

Quadro 3 - Quantidades típicas de rejeitos gerados pela atividade petrolífera no mar - Estimativa baseada na perfuração de 50 poços em uma única plataforma de produção.

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	45.000
Cascalho de perfuração	50.000
Água de produção	1.500 (por dia)

Fonte: Adaptação DIAS (2005)

As quantidades de fluidos de perfuração que não serão mais reutilizados (de base aquosa) e de cascalhos misturados com este mesmo tipo de fluido, na grande maioria dos países é permitido o descarte no mar após o tratamento com controles de sólidos. A proibição é para o descarte contínuo ou em batelada de fluidos de base não aquosa, com exceção do fluido associado ao cascalho, o qual obedece limites máximos de base orgânica aderida, conforme regulamentação específica (OGP, 2003).

A ação física do ambiente pode ser dividida em 2 tipos, sendo o primeiro, soterramento da comunidade bentônica com a modificação da textura do sedimento, devido a introdução de sólidos com granulometria original que são encontradas na parte superficial dos sedimentos na área local. A relação direta entre a composição química dos fluidos de perfuração aderida ao cascalho com a ecotoxicidade está diretamente ligada aos efeitos adversos para a fauna marinha, causando alterações fisiológicas, mudanças no comportamento e até a morte dos indivíduos afetados (CAPP, 2001; GERRARD *et al*, 1999; MONAGHAN *et al*, 1980; VEIGA, 2010).

A toxicidade aguda indica a quantidade para dose letal de um determinado produto químico feitos ensaios de acordo com a metodologia especificada na norma NBR 15.308 (ABNT, 2011),

expondo o microcústáceo *Mysidopsis juniae* ao determinado produto a ser testado por 96 horas, checando sua mortalidade a cada 24 horas. É determinado o CL50 96h que é a concentração letal para 50% dos organismos (GAMA, 2014; RAND, 1995; VEIGA, 2010).

Definição dos fluidos de perfuração

Os fluidos de perfuração são vistos de maneira bem diferentes pelos autores. De acordo com o Instituto Americano de Petróleo (API), a definição é qualquer fluido circulante capaz de tornar a operação de perfuração viável. Conforme Thomas *et al.* (2001) os fluidos são como misturas complexas de sólidos, líquidos, produtos químicos e até gases, podendo assumir aspectos de suspensão, emulsão ou dispersão coloidal dependendo do estado químico dos componentes. Do lado físico do fluido, assumem comportamentos não-newtonianos, não sendo constantes a taxa de deformação e de cisalhamento (MACHADO, 2002).

Principais funções e propriedades dos fluidos de perfuração

Diversos fatores afetam as características dos fluidos de perfuração durante uma operação de perfuração como, variações de profundidade, interações com a formação rochosa do poço, temperatura e variações de pressão. O fluido deve ser estável quimicamente, otimizar a separação dos cascalhos na superfície, não reagir com rochas produtoras, ser apto a receber tratamento químico e/ou físico, ser bombeável e deve ser pouco abrasivo e corrosivo (esfoliamento) com a coluna de perfuração e não ser prejudicial ao meio ambiente (THOMAS *et al.*, 2001) e ainda deve realizar as funções operativas, como o controle de pressão, fluviabilidade, estabilidade das formações e resfriamento da broca (DUARTE, 2004).

As propriedades dos fluidos que devem ser estudadas segundo Caenn *et al.* (1995) para classificar um fluido são: viscosidade, densidade, viscosidade, reatividade e controle de perda de fluido, a ser específico em cada item a reologia, parâmetros de filtração, teor de sólidos, PH, sólidos ativos e lubricidade (em caso de reatividade). São de extrema importância os itens citados, pois os estudos dos parâmetros reológicos podem ajudar no cálculo de perdas e carga na tubulação e determinação da velocidade em que os cascalhos são transportados, força de géis em caso de gelificação, fornecendo informações sobre resistência quando se dá o reinício de

seu escoamento depois de um determinado período de repouso. As forças géis e a viscosidade tem o poder de subir a probabilidade de desgaste de equipamentos e fraturas das formações rochosas. O PH tem uma significância ímpar no processo devido a capacidade de promover a corrosão de equipamentos e o teor de sólidos que influencia propriedades como densidade se tiver em altas quantidades.

Os fluidos de perfuração podem ser classificados em 2 grupos e mais os fluidos aerados. Os fluidos que são formados por água com ou sem a adição de sais segundo Thomas *et al.*(2001) são denominados fluidos base água. Nesse sistema, a dispersão dos materiais coloidais é feita pela água, sendo sua principal função. A divisão dos fluidos de base água se dá em inibidos (fluidos que passam por tratamentos físicos e/ou químicos), não-inibidos (onde não há tratamento químico do fluido), fluidos emulsionados em óleo e fluidos com baixo teor de sólidos. O objetivo da divisão entre os fluidos é simplesmente melhorar o seu desempenho. Em perfurações em camadas superficiais são utilizados os fluidos não-inibidos enquanto em perfurações em rochas com alto grau de atividade na presença de água doce são utilizados os fluidos inibidos. É muito pouca a utilização dos fluidos a base de ar, sugerindo seu uso em áreas do poço onde estão ocorrendo grandes perdas de circulação e em zonas produtoras com pressão muito baixa (CAENN et al.,1995). O outro grupo de fluidos são os NAF's que são largamente utilizados e são emulsões invertidas, sendo composto de fase interna as substâncias químicas e a fase continua o fluido base mais a água. A subdivisão dos fluidos se dá em 3 grupos da seguinte forma:

- ✓ Grupo I corresponde aos fluidos com elevado conteúdo aromático
- ✓ Grupo II corresponde aos fluidos com conteúdo aromático médio
- ✓ Grupo III corresponde aos fluidos com baixo ou desprezível conteúdo de aromáticos.

Os principais compostos do grupo I são óleo diesel e óleos minerais. Constituem um conjunto de vários compostos, dentre eles citam-se os hidrocarbonetos, as parafinas, os HAP's (Polycyclic aromatic hydrocarbons) ou hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, mos aromáticos e são produzidos a partir do refino do petróleo bruto. A característica principal destes fluidos é a manutenção da estabilidade dos poços, o fato de serem capazes de formar

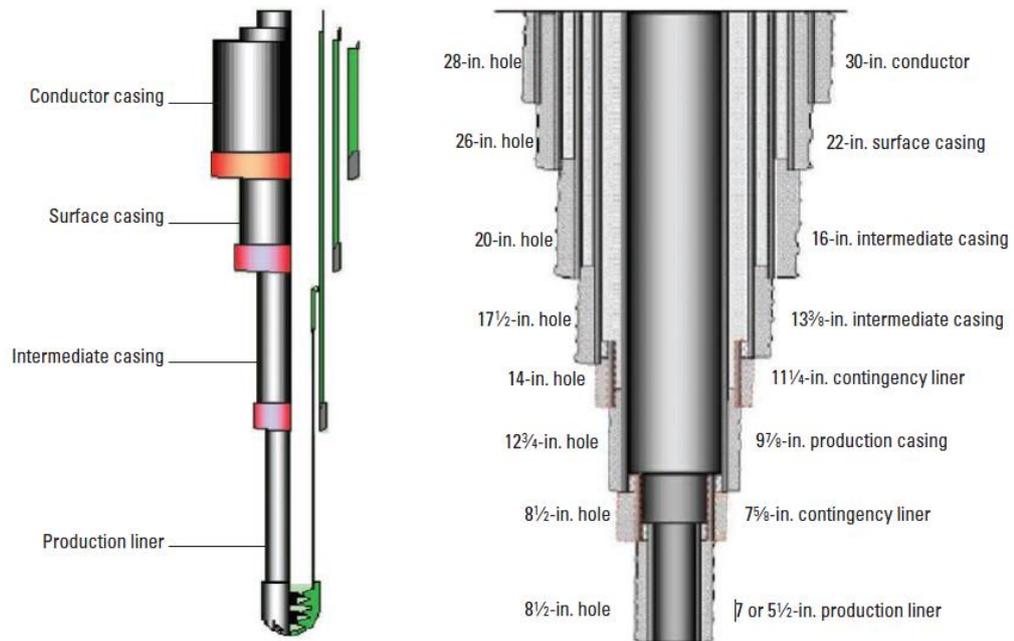
uma membrana semipermeável ideal, evitando a passagem de íons do fluido para a rocha e da rocha para o fluido. Podem ser emulsões inversas (com o teor de água variando entre 10% e 45%, em volume) ou emulsões água/óleo (com teor de água <10%, em volume).

Os processos de destilação são controlados para que os hidrocarbonetos totais e os HAP's fiquem abaixo dos valores estabelecidos para o grupo I. Fazem parte do grupo III os fluidos de base sintética produzidos por reações químicas de compostos puros e grupamentos químicos como (hidrocarbonetos sintéticos, acetais, ésteres e éteres). Esses são fluidos de perfuração a base de compostos sintéticos (SBF ou SBM). Devido a necessidade de fluidos que possuíssem características semelhantes aos fluidos a base de óleo, os SBF foram de forma a causar menor impacto ambiental, por serem menos tóxicos e possuir maior biodegrads (MAIRS, H. et al., 2000).

Operação de revestimento e cimentação

O poço é perfurado em fases, cujo número depende das características das zonas a serem perfuradas e da profundidade final prevista. Geralmente o número de fases de perfuração de um poço é de três ou quatro, podendo chegar a oito, em certos casos conforme mostrado na figura 3. Cada uma das fases é concluída com a descida de uma coluna de revestimento e sua cimentação (SCHAFFEL, 2002).

Figura 3– Poço exibindo os tipos de revestimento



Fonte: Manual de cimentação CEM 6 – Schlumberger

Segundo Schaffel (2002), o revestimento de superfície serve para isolar as zonas de produção no caso de um vazamento de uma tubulação específica, que é colocada dentro do revestimento para levar o óleo e gás até a superfície, contribuindo para prevenir desmoronamentos de formações não consolidadas e serve como base de apoio para equipamentos de segurança.

Segundo Ilyas *et al* (2012) o objetivo da operação de cimentação é proporcionar isolamento, criando uma vedação hidráulica impedindo assim o fluxo de fluidos do poço como óleo, água ou gás entre as formações ou à superfície. Assim que cada revestimento é assentado inicia-se a operação de cimentação. O bombeio da pasta de cimento é feito para ocupar o espaço anular entre o revestimento e as paredes do poço, fixando a tubulação e selando o espaço anular, sendo a vida útil do poço ser diretamente dependente da qualidade deste selo hidráulico, fazendo do trabalho de cimentação uma operação vital. O isolamento incompleto pode impedir tanto o poço de ser concluído, quanto posteriormente resultar na perda do poço produtor. A grande importância da operação de cimentação está relacionada ao fato de que o cimento deve manter suas propriedades durante toda a vida útil do poço a qual pode variar entre um a cinquenta ou mais anos.

Segundo Schaffel (2012) a operação de cimentação de forma simplificada é feita pelo bombeio da mesma, sendo bombeada antes um colchão espaçador para separá-lo do fluido de perfuração, pois o contato do mesmo com a pasta pode modificar as propriedades reológicas da mesma e tornar a operação inviável e possivelmente irreversível, pois forma-se uma mistura extremamente viscosa, onde as bombas não conseguem deslocá-lo para o poço. A pasta de cimento é formada por adição de cimento em pó à água de mistura, que é composta de aditivos químicos líquidos ou sólidos dissolvidos ou suspensos em água doce, água do mar ou em *Brine* que é uma aquosa de cloreto de sódio ou de potássio. Os aditivos dão a pasta de cimento o comportamento ideal para o sucesso da operação de cimentação. Já o colchão espaçador compõe-se basicamente de agentes tensoativos, viscosificantes e adensantes, é bombeado antes da pasta com função de limpar o poço e evitar o contato da pasta com o fluido de perfuração, modo a permitindo assim o melhor posicionamento da pasta de cimento

Á água de mistura é composta por aditivos com determinadas funções:

- Aceleradores- visam diminuir o tempo de pega da pasta de cimento;
- Retardadores- prolongam o tempo de pega do cimento;
- Dispersantes- Aditivos que facilitam a mescla das pastas e determinadas interações com outros aditivos;
- Estensores- Absorventes de água ou aditivos para redução de peso;
- Aditivos contra perda de fluido- são utilizados polímeros para reduzir a taxa de expulsão da água presente no cimento para formações permeáveis;
- Aditivos contra a perda de circulação- vedam zonas que possuam a tendência de absorver os fluidos, por serem inconsolidadas ou fracas;
- Agentes antiespumante- são aplicados para alterar a tensão superficial do cimento e
- Agentes anti-migração de gás – são responsáveis por bloquear o gás se nas zonas perfuradas tiver a presença do mesmo (SCHAFFEL, 2002);

A cimentação primária é realizada logo após a descida de cada coluna de revestimento no poço. Seu objetivo é basicamente preencher o espaço anular de modo a se obter fixação e vedação eficiente e permanente deste, a secundária é o nome dado às operações que se destinam a correção da primária, desse modo quando o topo do cimento não alcançar a altura prevista

pode-se efetuar uma recimentação quando esta não é possível realizar-se a compressão se cimento ou squeeze (para correção de uma cimentação malfeita). A de revestimentos intermediários, de produção e *liners* (é uma seqüência parcial de tubo que não retorna à superfície, sendo que podem ou não ser cimentados) são exemplos de cimentação primária e tem o objetivo de isolar as formações incompetentes e sensíveis ao contato com o fluido de perfuração., proteger as zonas portadoras de hidrocarbonetos para evitar redução da produtividade.(THOMAS, 2001).

As pastas de cimento utilizadas pela indústria do petróleo devem passar por diversos testes padronizados, que simulam o comportamento da pasta em função das condições previstas dentro do poço, tais como pressão, temperatura, o tempo de operação e regime de fluxo durante o deslocamento. Os principais testes realizados são reologia, água livre, resistência a compressão, perda de filtrado (perda de água sob pressão), densidade e consistometria (tempo de espessamento) (Próprio Autor).

As operações com fluidos de completção são realizadas na etapa posterior à perfuração e cimentação dos poços, dando prosseguimento a construção do poço. Seu objetivo é estabelecer a comunicação física entre a formação produtora e o poço. Nessa operação acontece a substituição dos fluidos de perfuração pelos de completção, os quais apresenta composições específicas para evitar danos às zonas de interesse. Ao término da operação, o fluido de completção é recolhido do poço, recebido em tanque específico na unidade marítima e submetido à sua destinação apropriada, que em alguns casos pode ser o descarte direto no mar. De maneira geral, as operações com os fluidos de completção são simplificadas e consistem no bombeio adequado do fluido preparado para o poço, segundo (SCHAFFEL, 2002).

Potencial de danos dos resíduos descartados em mar aberto

O IBAMA permite o descarte em mar aberto de resíduo de fluido de perfuração de base aquosa, fluido de perfuração complementar, cascalho associado a fluido de perfuração aquoso e a não aquoso quando todos os critérios definidos na minuta técnica são atendidos. Os sistemas

de gestão normalmente adotados para contornar os impactos ambientais decorrentes de emissões, lançamentos e disposição de efluentes no meio ambiente, em geral recaem na minimização do volume de rejeitos gerados, na maximização do reuso e reciclagem dos mesmos. Os fatores operacionais influenciam diretamente nas características e volumes de cada um, uma vez que os mesmos fatores também influenciam na reciclagem, na reutilização, na redução e até mesmo no descarte desses resíduos (VEIGA, 2010).

Quadro 4 - Critérios para descarte de fluidos de perfuração.

CONDIÇÕES PARA DESCARTE EM ÁGUAS MARINHAS	
FLUIDOS DE PERFURAÇÃO DE BASE AQUOSA	Não deve ser detectada presença de óleo livre, Por meio do Teste de Iridescência Estática em amostra do fluido coletada em momento pré-descarte.
	O resultado da CL50-96h, pelos métodos NBR 15308 e NBR 15469, realizada com amostra de fluido coletada no momento pré-descarte, deve ser superior a 30.000 ppm da FPS.
FLUIDOS COMPLEMENTARES DE BASE NÃO AQUOSA	Não será permitido o descarte de fluidos de perfuração e complementares de base não aquosa em águas marinhas.
FLUIDOS COMPLEMENTARES DE BASE AQUOSA	Não devem conter óleo diesel, lignosulfonato de ferrocromo, lignosulfonato de cromo, ligas de ferrocromo ou brometo de zinco (ZnBr ₂).
	Não devem conter óleo diesel, lignosulfonato de ferrocromo, lignosulfonato de cromo, ligas de ferrocromo ou brometo de zinco (ZnBr ₂).
	O resultado da CL50-96h, pelos métodos NBR 15308 e NBR 15469, realizada com amostra de fluido coletada no momento pré-descarte, deve ser superior a 30.000 ppm da FPS.

Fonte: Adaptação de IBAMA (2014).

Quadro 5 - Critérios para descarte de cascalho associado a fluidos de perfuração.

CONDIÇÕES PARA DESCARTE EM ÁGUAS MARINHAS	
CASCALHO ASSOCIADO A FLUIDOS DE PERFURAÇÃO DE BASE AQUOSA	Não deve ser detectada presença de óleo livre, através do Teste de Iridescência Estática em amostra do fluido coletada em momento pré-descarte.
	O resultado da CL50-96h, pelos métodos NBR 15308 e NBR 15469, realizada com amostra de fluido coletada no momento pré-descarte, deve ser superior a 30.000 ppm da FPS.
	Não deve ser detectada presença de óleo livre, através do Teste de Iridescência Estática em

CASCALHO ASSOCIADO A FLUIDOS DE PERFURAÇÃO DE BASE NÃO AQUOSA	amostra do fluido coletada em momento pré-descarte.
	O resultado da CL50-96h, pelos métodos NBR 15308 e NBR 15469, realizada com amostra de fluido coletada no momento pré-descarte, deve ser superior a 30.000 ppm da FPS.
	Não deve ser detectada contaminação por óleo da formação, conforme o método <i>Reverse Phase Extraction</i> (RPE) em amostra do fluido coletada em momento pré-descarte.
	Não deverá exceder o limite de 6,9% de n-parafinas, olefinas internas, olefinas alfa lineares, polialfa olefinas e fluidos a base de óleo mineral tratados ou de 9,4% de base orgânica de ésteres, éteres e acetais no Teste de Retorta de Massa.

Fonte: Adaptação de IBAMA (2014).

A abrangência do impacto ambiental potencial de um eventual descarte dos resíduos da construção de poços está diretamente dependente das características ambientais específicas do corpo receptor, bem como das propriedades intrínsecas do material descartado. O potencial impacto depende principalmente do material, da sua concentração após a liberação e da comunidade biótica que está sendo exposto a ele alguns riscos ambientais podem ser significativos, enquanto outros são muito baixos (BRANDSMA, 2004; FINK, 2012; REIS, 1996c; VEIGA, 2010).

Segundo Veiga (2010), a presença de várias substâncias tóxicas em vários ecossistemas e em diferentes compartimentos (ar, água, sedimentos ou biota) expõe a todo tempo a riscos os organismos vivos, não estando livre totalmente do perigo, apesar de se adotar medidas preventivas como seleção de insumos de baixa toxicidade e de tecnologias de tratamento mais eficientes contribuem sobremaneira para a redução de impactos ambientais decorrentes dos lançamentos de substâncias químicas tóxicas em concentrações críticas.

Outros aspectos caracterizam a preocupação ambiental no que tange aos descartes dos rejeitos das operações da perfuração no ambiente marinho além do volume gerado de resíduo, segundo LAM *et al* (2001), REIS (1996c) e VEIGA (2010) alguns e são eles:

- Efeito toxicológico sobre os organismos presentes na coluna d'água;

- Destino e persistência do material sólido e dos produtos químicos presentes nos resíduos no assoalho oceânico;...
- Alteração da granulometria dos sedimentos marinhos;
- Soterramento das comunidades marinhas bentônicas;
- Depleção de oxigênio no sedimento, devido a biodegradação de compostos orgânicos presentes, notadamente nos fluidos de base não aquosa.

De acordo com Dias (2005) e Schaffel (2002), os impactos ambientais devido ao descarte de fluidos de perfuração e cascalho atuam temporariamente na área onde é feito o mesmo, ou seja: no entorno do ponto de descarte. O processo de dispersão destes sólidos depende amplamente das condições ambientais (correntes, densidade, temperatura), e das propriedades do material (granulometria, densidade) e será muito importante para a caracterização da área de impacto.

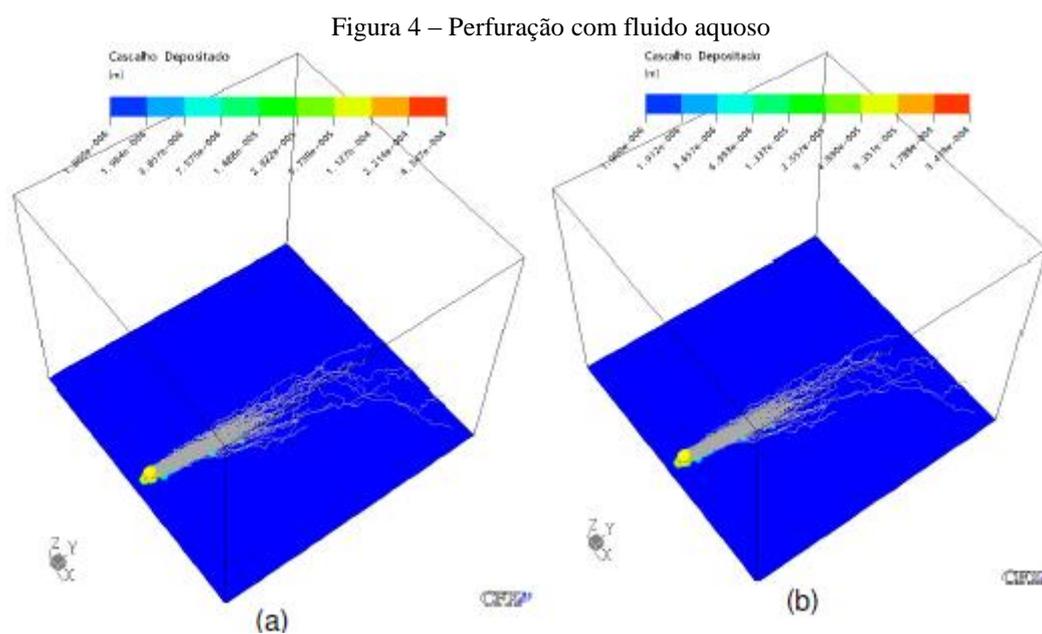
É importante notar que apenas os aspectos físicos relacionados ao deslocamento em mar aberto da parte sólida do resíduo descartado foram tratados neste trabalho. Todos outros inúmeros processos (químicos, biológicos e ecológicos) que contribuam para a destinação final dos resíduos lançados no ambiente marinho estão fora do escopo deste trabalho.

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, segundo Dias (2005). A modelagem numérica do transporte de poluentes é baseada nas equações de conservação da massa, da quantidade de movimento e da energia, acopladas às equações de transporte das espécies químicas, que são uma combinação dos fenômenos de advecção, difusão, fontes e/ou sumidouros.

O MOHID é uma plataforma de simulação hidrodinâmica e transporte de constituintes em suspensão e solução. A filosofia do novo modelo MOHID (MIRANDA et al., 2000) permite sua utilização em abordagens uni, bi e tridimensionais que tem sido aplicado em diversas regiões costeiras e estuários. O modelo tem emprego tanto em projetos de consultoria quanto como ferramenta de pesquisa. Já foi utilizado em diversas regiões costeiras em Portugal como

o estuário de Minho, Lima e Mondego e lagoas como Rio Aveiro e Ria Formosa (MARTINS *et al.*, 2000), também em outras regiões costeiras da Península Ibérica como Gironde na França. O modelo anteriormente também já foi testado em mar aberto, como fonte para geração interna de ondas de maré (NEVES *et al.*, 1998) e simulação do descarte do resíduo da limpeza de unidades de cimentação de operações de petróleo e gás em mar aberto (CAMPOS *et al.*, 2015) e na simulação computacional de deriva oceânica de petróleo na bacia de Campos (JULIANO *et al.*, 2012)

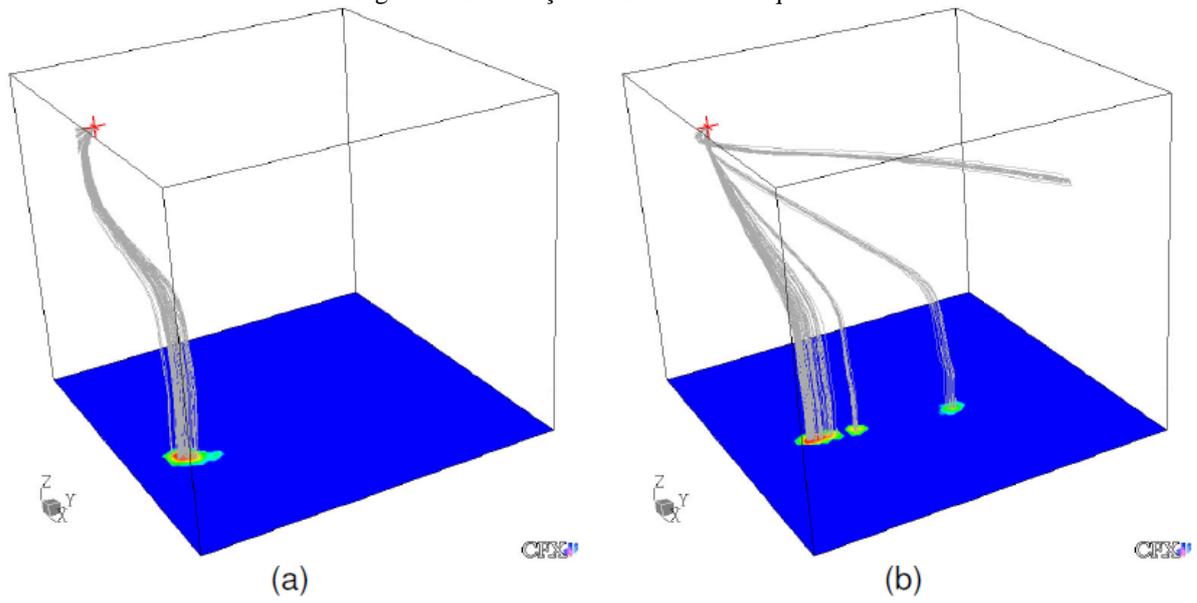
Segundo o estudo de Dias (2005), é notório o efeito da dispersão turbulenta atuando sobre as partículas, sobretudo aquelas de menor tamanho, que chegam a migrar para camadas superiores do fluxo, superando a diferença de densidade com a fase contínua, notando-se uma dispersão maior devido à interação com o meio.



Fonte: Dias 2005

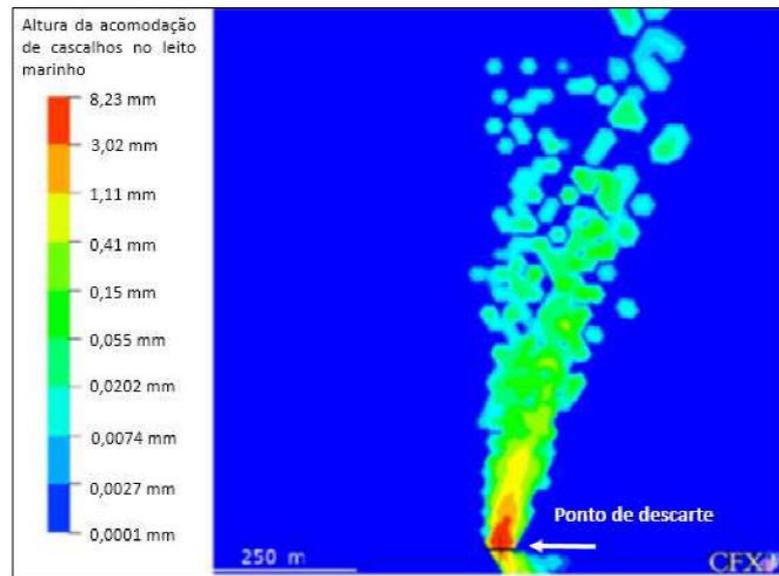
Quando se utilizou o fluido não aquoso conforme o gráfico mostra que a trajetória é mais concentrada, devido a dificuldade de interação com o meio. Nas figuras abaixo mostra a trajetórias de partículas para a etapa de perfuração empregando fluido de base aquosa.

Figura 5 - Perfuração com fluido não aquoso.



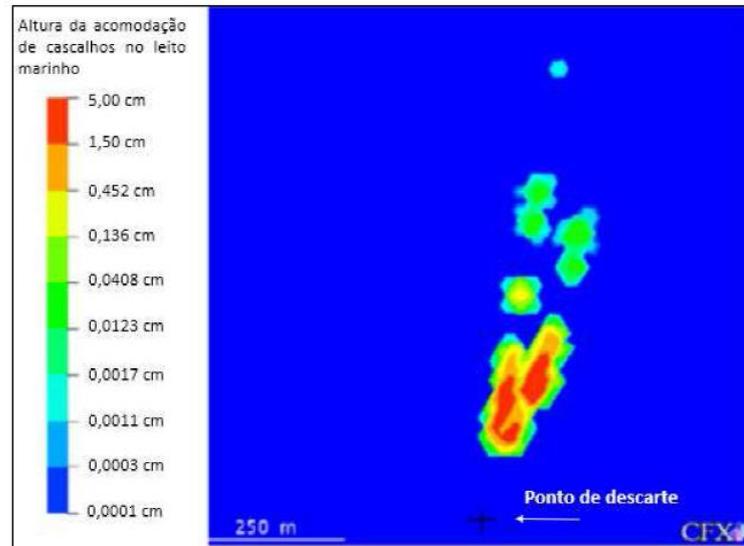
Fonte: Dias 2005

Figura 6 - Espessura do cascalho aderido a fluido aquoso acumulado no leito marinho



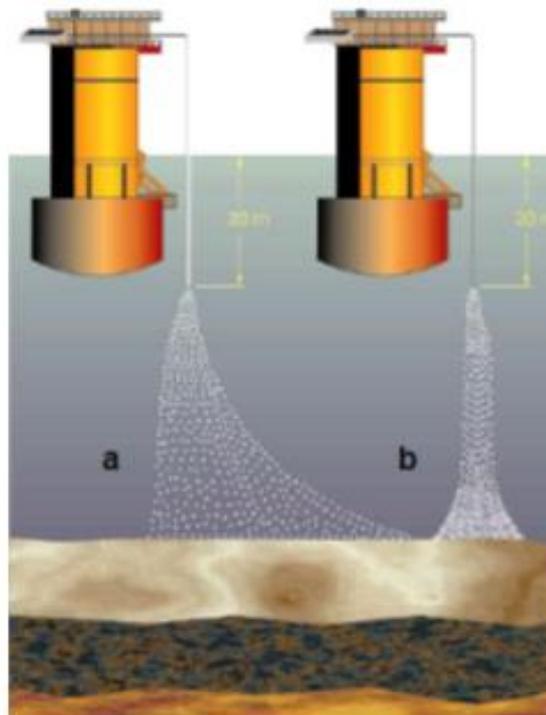
Fonte: Adaptação de Dias (2004)

Figura 7 – Espessura do cascalho aderido a fluido não aquoso acumulado no leito marinho



Fonte: Adaptação de Dias (2004)

Figura 8 - Estimativas dos totais de cascalho aderido a fluido base aquosa (A) e a fluido base não aquosa (B) acumulados no fundo.



Fonte: OGP 2003

Conclusão

O estabelecimento de um marco regulatório, no que tange aos controles da poluição dessa atividade, definiu novas diretrizes, que incentivarão a redução dos quantitativos gerados, bem como a adoção de novas formas para tratamento e disposição dos resíduos. Contudo, o crescimento das atividades de exploração, produção e escoamento de petróleo deverá estar alinhado com o desenvolvimento e ampliação do mercado nacional voltado ao transporte, tratamento e disposição final de resíduos, de forma a reduzir ao máximo o impacto ambiental causado por estas atividades.

A revisão realizada no presente estudo aponta que as soluções adotadas para as atividades de perfuração e cimentação de poços de petróleo e gás são bem definidas e que o órgão ambiental buscou estabelecer mecanismos de controle e de monitoramento constante junto ao gerador, tanto durante a opção de descarte em mar aberto quanto no recolhimento para destinação em terra, estabelecendo diretrizes para a destinação final dos rejeitos das operações de perfuração de poços de petróleo e gás.

A revisão sobre o processo de produção de resíduos gerados nas operações de perfuração e cimentação que são utilizados nas operação offshore, e a busca de se conhecer melhor o resultado advindo da geração desses resíduos a bordo, de sua disposição em terra e do descarte de rejeitos no mar revelou-se relevante para a compreensão dos mecanismos estabelecidos para a minimização de impactos, visando a melhoria os controles ambientais. Dada a complexidade do tema recomenda-se o uso de simulações computacionais de possíveis descartes do fluido complementar colchão espaçador para um possível entendimento do comportamento das partículas ao serem descartadas e sua deposição no leito oceânico. Sugere-se a realização de simulações em 3 profundidades diferentes, com volume conhecido, para que se tenha uma idéia da diferença das características da deposição, uma vez que não foram encontrados registros de simulações com o fluido em questão.

O posicionamento da principal empresa produtora de petróleo no Brasil é de não descartar nenhum fluido no oceano, obedecendo portanto aos princípios da prevenção e da precaução.

Referências Bibliográficas

ABNT; Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15.308 – Ecotoxicologia Aquática – Toxicidade Aguda – Método de ensaio com misidáceos (Crustacea). Rio de Janeiro, 2011. 25 p.

AYERS Jr, R. C.; Fate and effects of drilling discharges in the marine environment. **Am. Soc. for environ. Educ.** 1982. p. 218-234.

BAKKE, T.; KLUNGSOYR, J.; SANNTI, S.; Environmental impacts of produced water and drilling waste discharges from the Norwegian offshore petroleum industry. **Marine Environmental Research.** Maryland, 2013. v. 92, p. 154-169.

BORTHWICK, A.G.L, MARCHANT, R.D., COPELAND, G.J.M., ADAPTIVE HIERARCHICAL GRID MODEL OF WATER-BORNE POLLUTANT DISPERSION, **ADVANCES IN WATER RESOURCES** 23 (2000), P. 849-865.

BRANDSMA, M. G.; Automatic validation of the Offshore Operators Committee Discharge Model and application to predicting drilling solids accumulation on the sea floor. **Environmental Modelling & Software.** Durango, 2004. v. 19, p. 617–628.

BRASIL, 2014. Ministério do Meio ambiente. IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Minuta para Consulta Pública da Nota Técnica CGPEG/DILIC/IBAMA nº XX/14.** Novas diretrizes para uso e descarte de fluidos de perfuração e cascalhos, fluidos complementares e pastas de cimento nos processos de licenciamento ambiental dos empreendimentos marítimos de exploração e produção de petróleo e gás natural. Disponível em: <<https://www.ibama.gov.br/licenciamento/petroleo/procedimentos>>. Acesso em 25 jul. 2015.

CAENN, R.; DARLEY, H. C. H.; GRAY, G. R.; Introduction to Drilling Fluids. In: _____ - **Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids.** 6. ed. Waltham: Gulf Professional Publishing, 2011a. cap. 1.

CAENN, R.; DARLEY, H. C. H.; GRAY, G. R.; Introduction to Drilling Fluids. In: _____ - **Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids.** 6. ed. Waltham: Gulf Professional Publishing, 2011b. cap. 12.

CARNEIRO ET AL., MONITORAMENTO AMBIENTAL DA ATIVIDADE DE PERFURAÇÃO DE POÇOS DE ÓLEO E GÁS NA BACIA DE CAMPOS. RELATÓRIO FINAL: **Caracterização e Monitoramento Pós-Atividade, Centro de Pesquisas da PETROBRAS,** Rio de Janeiro, 2003

CAPP; CANADIAN ASSOCIATION OF PETROLEUM PRODUCERS. **Offshore drilling waste management review**. Canadian Association of Petroleum Producers. Calgary, Alberta, 2001. Technical Report. 289 p.

CAMPOS, L. F., LUGON JR, J., TELLES, W. R., RODRIGUES, P. P. G. W. Estudo da geração de resíduos nas operações de perfuração e cimentação durante a construção de poços marítimos de óleo e gás. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**. Essentia Editora, in press, 2014

DIAS, G. J.; COUTINHO, A. L. G. A.; MARTINS, R. P.; Modelagem Tridimensional do lançamento de cascalhos de perfuração de poços de petróleo em águas profundas. **Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás**. Salvador, 2004.

DIAS, G. J; **Modelagem Tridimensional do Lançamento de Rejeitos das Atividades de Exploração e Produção de Petróleo em Águas Profundas**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Programa de Engenharia Civil. Rio de Janeiro, 2005. 123 p.

DUARTE, Ricardo Gomes. **Avaliação da Interação Folhelho-Fluido de Perfuração para Estudos de Estabilidade de Poços**. 2004. Tese de Doutorado. PUC-Rio.

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

FINK, J. K.; Waste Disposal. In: FINK, J. K. **Petroleum Engineer's Guide to Oil Field Chemicals and Fluids**. Waltham: Elsevier, 2012. cap. 20.

GAMA, M. C. G. F.; **Avaliação de uma unidade embarcada de tratamento de fluidos de perfuração de base não aquosa contaminados com interface de deslocamento e águas residuárias oriundos da perfuração marítima**. Dissertação (Mestrado) – Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental do Departamento de Engenharia Civil. Rio de Janeiro, 2014. 104 p.

GETTLESON, D. A.; Effects of oil and gas drilling operations on the marine environment. In: GEYER, R. A. **Marine Environment Pollution I**. 1 ed. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1980. cap. 14.

GERRARD, S.; GRANT, A.; MARSH, R.; LONDON, C.; **Drill cutting piles in the North Sea: management options during platform decommissioning**. Centre for Environmental Risk. School of Environmental Sciences of University of East Anglia. Norwich, 1999. research report n. 31.

HOLDWAY, D. A.; The acute and chronic effects of wastes associated with offshore oil and gas production on temperate and tropical marine ecological processes. **Marine Pollution Bulletin**. Melbourne, 2002. v. 44, p. 185–203.

ILYAS, M.; SADIQ, N.; MUGHAL, M. A.; PARDAWALLA, H.; NOOR, S. M.; SPE-163128 - Improvement of Cementing in Deep Wells. **SPE/PAPG Annual Technical Conference**. Paquistão, 2012.

JULIANO, M. M. F.; NEVES, R.; RODRIGUES, P. P. G. W.; LUGON Jr, J.; FERNANDES, R.; Aplicação da Plataforma MOHID para simulação computacional de deriva oceânica de petróleo na bacia de Campos – RJ. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, Campos dos Goytacazes/RJ, v. 6 n. 1, p. 161-172, jan. / jun. 2012.

KHONDAKER, A.N.; Modelling the fate of drilling waste in marine environment - an overview, **Computers & Geosciences**. Dhahran, 2000. n. 26, p. 531-540.

LAM, P. K. S.; GRAY, J. S. Predicting effects of toxic chemicals in the marine environment. **Marine Pollution Bulletin**. Oxford, 2001. v. 42, n. 3, p. 169-173.

MACHADO, José Carlos Vieira. **Reologia e escoamento dos fluidos: ênfase na indústria do petróleo**. Interciência, 2002.

MELTON, H. R.; SMITH, J. P.; MARTIN, C. R.; NEDWED, T. J.; MAIRS, H.L.; RAUGHT, D. L.; Offshore discharge of drilling fluids and cuttings – A scientific perspective on public policy. **Rio Oil & Gas Conference**. Rio de Janeiro, 2000.

MENZIE, C. A.; The environmental implications of offshore oil and gas activities. **Environ. Sci. Technol.** Waltham, 1982. v. 16, n. 8.

MONAGHAN, P. H.; MCAULIFFE, C. D.; WEISS, F. T.; Environmental aspects of drilling muds and cuttings from oil and gas operations in offshore and coastal waters. In: GEYER, R. A. **Marine Environment Pollution I**. 1. ed. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1980. cap. 15.

NEVES, R.; COELHO, H.; LEITÃO, P.; MARTINS, H.; SANTOS, A. **A numerical investigation of the slope current along the western European margin**. In: BURGANO, V.; KARATZAS, G.; PAYATAKAS, A.; BREBBIA, C.; GRAY, W.; PINDER, G. (Ed.). In: COMPUTACIONAL METHODS IN WATER RESOURCES, 12., v.2, p. 369-376, 1998.

OGP, INTERNATIONAL ASSOCIATION OF OIL & GAS PRODUCERS. **Environmental aspects of the use and disposal of non-aqueous drilling fluids associated with Offshore Oil & Gas Operations**. London, 2003. 114 p. Report n. 342.

PIPER, W.; HARVEY, T.; MEHTA, H.; Waste Management. In: ASME. **Drilling Fluids Processing Handbook**. Burlington: Elsevier, 2005. cap. 16.

PIRES, P. J. M. **Utilização de cascalho de perfuração de poços de petróleo para a produção de cerâmica vermelha**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2009.

POLLIS, A. M.; **Avaliação das emissões de gases de efeito estufa através da comparação dos métodos de destinação final de resíduos gerados na atividade de produção de petróleo offshore**. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Gestão). Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Gestão da Universidade Federal Fluminense. Rio de Janeiro, 2008.

RAND, G. M.; **Fundamentals of Aquatic Toxicology: Effects, Environmental Fate and Risk Assessment**. CRC Press. Boca Raton. 2. ed. Florida, 1995. p. 30.

REIS, C. J.; Drilling and Production Operations. In: _____ - **Environmental Control in Petroleum Engineering**. 1. ed. Texas: Gulf Professional Publishing, 1996a. cap. 2.

REIS, C. J.; **Environmental control in petroleum engineering**. Houston, Texas: Gulf Publishing Company, 1996b. p. 19-20.

REIS, C. J.; The Impact of Drilling and Production Operations. In: _____ - **Environmental Control in Petroleum Engineering**. 1. ed. Texas: Gulf Professional Publishing, 1996c. cap. 3.

SCHAFFEL, S. B.; **A questão ambiental na etapa de perfuração de poços marítimos de óleo e gás no Brasil**. Tese (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Programa de Planejamento Energético. Rio de Janeiro, 2002. 147 p.

THOMAS, J.E.; **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 2001. 271 p.

TOLDO Jr, E. E.; AYUP-ZOUNAIN, R. N.; NETTO, S. A.; Environmental monitoring of offshore drilling for petroleum exploration (MAPEM Project): shallow waters. **Environmental Monitoring and Assessment**. 2009. v. 167, issue 1-4, p. 1-5.

VEIGA, L.F. **Estudo de toxicidade marinha de fluidos de perfuração de poços de óleo e gás**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal Fluminense. Niterói, 1998.

VEIGA, L. F.; **Avaliação de risco ecológico dos descartes da atividade de perfuração de poços de óleo e gás em ambientes marinhos**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Programa de Engenharia Civil. Rio de Janeiro, 2010. 254 p.

ARTIGO CIENTÍFICO 2

Simulação computacional do descarte em mar aberto do volume morto de colchão espaçador gerado em operações de cimentação de poços de óleo e gás

Resumo

Neste artigo foi aplicada a modelagem computacional para simular o descarte do volume morto de colchão espaçador gerado nas operações de cimentação de poços de petróleo e gás em três profundidades de lâmina d'água diferentes. Foram feitas três simulações para prever o comportamento das partículas de sulfato de bário, composto predominante nos espaçadores, em caso de um descarte em operações *offshore*. Foi utilizado o software MOHID através do módulo lagrangiano acoplado as soluções hidrodinâmicas em diferentes profundidades para que se tivesse uma ideia da possível área afetada pelos resíduos sólidos descartados no fluido em questão.

Palavras-chave:

Modelagem computacional; MOHID; Colchão espaçador; Ambiente Marinho; Lagrangiano.

Computer simulation of the offshore disposal of the dead volume of spacer in the cementing operation of oil and gas wells

Abstract

In this article, was applical to computer modeling to simulate discarding the dead volume of spacer generated in the cement cementing of oil wells and gas operations at three different depths. Simulations were performed to predict the behavior of the particles of barium sulphate that is the predominant solid spacers disposal in offshore operations. MOHID software was used by Lagrangian module at MOHID softwarewith hydrodynamic solutions at different depths was used to estimate area possibly affected by solid fluid solid waste disposal.

Keywords:

Computer modeling; MOHID; Spacer; Marine Environment; Lagrangian.

Introdução

As atividades de exploração de petróleo se deparam com verdadeiro um desafio **quanto no que diz respeito a manutenção do equilíbrio ambiental. Com o alto potencial de** impacto ambiental negativo em contraponto às necessidades energéticas, a mitigação dos impactos deve ser contemplada com a promoção de oferta de recursos visando energia, a sustentabilidade deve ser previamente contemplada em todas as suas etapas (DIAS, 2005). De acordo com Campos (2015), o impacto ambiental é inevitável, pois suas atividades estão diretamente ligadas as descargas de rejeitos e geração de volumes residuais são geradas em cada etapa de seu processo.

Os impactos ambientais advindos das atividades de exploração e produção de óleo e gás estão associadas a danos à flora e à fauna, uma vez que há a retirada de vegetação no local de onde será feita a atividade, a erosão provocada por esta retirada, agressões devido aos resíduos de fluidos da própria perfuração, podendo causar contaminações de lençóis freáticos se houver perda dos fluidos para as formações durante o processo (DE SOUZA *et al*, 2002).

Alguns dos resíduos da atividade petrolífera são denominados fluidos complementares, e tal como definição é dada a todos os demais fluidos utilizados durante a perfuração, cimentação e completação de poços. Um desses fluidos, o colchão espaçador, é o objeto de estudo do presente trabalho, por ser preparado em excesso. O volume que não é bombeado para o poço, caracterizado como “volume morto”, é transportado para terra por meio de embarcações para ter seu descarte feito adequadamente, seguindo a figura 9), uma vez que o órgão ambiental (IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis) definiu que deverá ser feita da forma que menos impacte o meio ambiente. O colchão espaçador caracteriza-se por formulações químicas utilizadas para deslocar fluidos dos poços, antes da utilização de outros fluidos, sendo sua principal função a separação de fluidos que podem ser incompatíveis entre si (BRASIL, 2014).

Figura 1 – Esquema de tratamento do volume morto de colchão espaçador.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2016)

O descarte dos fluidos complementares segue o esquema mostrado na figura 1 e tem suas condições determinadas pelo IBAMA (BRASIL, 2014). Os fluidos complementares de base aquosa têm seu descarte liberado pelo IBAMA com as seguintes condições de acordo com o quadro 6:

Quadro 1 - Condições para descarte de colchão espaçador

Requisitos para o descarte de fluidos complementares	
Colchão espaçador	Não conter óleo diesel, lignosulfonato de ferrocromo, lignosulfonato de cromo, ligas de ferrocromo ou brometo de zinco (ZnBr ₂) e outros produtos que o órgão ambiental julgar necessário proibir conforme justificativas tecnicamente fundamentadas e se não for detectada a presença de óleo livre no fluido, através do Teste de Iridescência Estática.
	Se os resultados CL 50-96h ficarem acima de 30000ppm da FPS .
	Se não houver adição de novos componentes na formulação previamente testada.
	Quando os fluidos utilizarem os referidos sais na formulação, não haverá necessidade de realização de ensaios de ecotoxicidade em amostras retiradas pré-descarte; Desta forma, os fluidos poderão ser descartados atendendo

	Resultado da concentração de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA- 16 prioritários), pelo método EPA 8270C realizada com amostra coletada em momento pré-descarte, seja maior que 10ppm.
--	--

Fonte: Adaptação de IBAMA (2014).

O colchão espaçador é de extrema importância para a operação, pois a pasta de cimento não pode entrar em contato com o fluido de perfuração por problemas de incompatibilidade. Uma vez que entre em contato, tem suas propriedades físicas alteradas impossibilitando até a continuidade do bombeio da mesma. O colchão é constituído por água, surfactante, geralmente um antiespumante, estendedor (para dar sustentação ao mesmo, visando a estabilidade) e agente de peso (Sulfato de bário ou carbonato de cálcio, onde a primeira é utilizada na maioria das vezes) (Próprio autor)

Nas sondas os colchões são preparados em batch mixes (misturadores em bateladas) conforme a figura 10, que são equipamentos que permitem a mistura de pastas de cimento e outros fluidos. São capazes de lidar com grandes volumes e reduzem significativamente os sobrenadantes dos produtos misturados, conforme a Figura 2 abaixo:

Figura 2 – Unidade de “batch mixer” para misturas para operação de cimentação.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2016).

Durante a operação é gerado um volume superior àquele que efetivamente será utilizado como uma medida operacional de segurança para evitar falta de fluido durante a execução da operação. Esse volume é chamado de volume morto.

Quadro 2 - Volume morto de espaçador gerado após as fases de cimentação de um poço

Resíduo	Volume gerado*
Volume morto de colchão espaçador	10 barris ou 1589,87 litros
Volume morto de colchão espaçador estimado após 1 fase do poço	

Fonte: Próprio autor (2016)

O volume morto de colchão espaçador que não foi bombeado para o poço durante a operação foi colocado em “cementing boxes” como a da Figura 3 abaixo e aguarda o desembarque para ser tratado em terra e disposto de acordo com regulamentações locais.

Figura 3 – Caixas de contenção para armazenamento e transporte de resíduos de cimentação.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2016)

O Sulfato de bário é o principal componente do colchão espaçador segundo IBAMA (2014), para cada lote previsto para as preparações dos colchões de cimento deverão ser analisadas também as concentrações de alumínio, arsênio, chumbo, cobre, cromo, ferro, manganês, molibdênio, níquel, silício, vanádio e zinco. Os ensaios deverão ser realizados por

meio dos métodos US EPA 3052 (Digestão Ácida da Amostra) e US EPA 6010C (Determinação de Cobre, Cromo, Zinco, Chumbo, Níquel, Molibdênio, Arsênio, Silício, Alumínio, Ferro, Manganês e Vanádio).

Considerando-se que o fluido colchão espaçador esteja de acordo com todos os requisitos para que seja feito o descarte do mesmo em mar aberto, foi construído um modelo computacional através do programa MOHID visando simular a deposição de suas partículas no leito marinho.

Segundo Pessanha (2012), a modelagem pode ser definida pelo simples ato de modelar ou representar algo e que a modelagem matemática ou computacional representa uma simulação de fenômenos reais por meio de fórmulas matemáticas. Lima (2010) define como o processo de representações da estrutura e/ou funcionamento de um sistema para compreender a realidade observada. Souza (2006) diz que é simplesmente uma tradução da formulação física/processo que fazer a modelagem (fundamentada em leis empíricas ou universais) em uma formulação matemática.

Dentre outros mais temos IRITANI, 1998 *apud* BONGANHA *et al*, 2007:

Consiste na representação matemática do que acontece na natureza a partir de um modelo conceitual, idealizado com base no levantamento e interpretação de dados e observações do sistema real, tendo como objetivo uma melhor compreensão do sistema atual, prevendo situações futuras, algumas vezes passadas, mas sempre direcionando ações decisivas. (IRITANI, 1998 *apud* BONGANHA *et al*, 2007).

Amaral (2003) que afirma que na modelagem é primordial o modelo matemático.

A modelagem matemática é a tradução para a linguagem matemática do modelo conceptual do objeto de pesquisa, uma vez que quanto melhor e mais completo o modelo conceptual, mais complexo será o modelo matemático e conseqüentemente maior é a dificuldade para se obter uma solução geral. Por esta razão, o modelo matemático é a grande encruzilhada do processo de modelagem... (AMARAL, 2003).

De uma maneira generalizada, os modelos matemáticos tentam mostrar em sua simulação a forma mais prática e simples a realidade de determinadas situações, trazendo o imaginário para o campo visual, mas para isso as condicionantes do evento a ser simulado e as características do objeto de estudo tem que estar inseridas para que seja feita da forma mais realística o possível (PESSANHA, 2012).

O comportamento futuro do objeto de estudo é previsto pela modelagem computacional. É possível fazer uma análise das propriedades e comportamento do que está sendo estudado com a inserção de dados de entrada e coleta de dados de saída. O processo de execução do modelo matemático computacional na representação de um sistema é chamado de simulação (MARIA, 1997).

Um modelo matemático é formado por um conjunto de equações, que por sua vez, formam as hipóteses. As hipóteses são utilizadas na construção de um modelo matemático, se baseando em um sistema real (RENNÓ E SOARES, 2000). As equações do modelo não possibilitam a explicação científica do mesmo (SODRÉ, 2007).

A hidrodinâmica da região a ser modelada é de suma importância, pois a simulação será de descarte do volume morto de espaçadores feito nas sondas, isso se autorizado previamente pelo órgão ambiental. O meio ambiente marinho será onde o fluido será descartado, sendo o real objeto de estudo a parte sólida do mesmo e avaliar seu comportamento na coluna d'água e sua deposição no leito marinho. A escolha de uma metodologia é essencial para o sucesso de uma simulação, haja visto que o meio a ser simulado está sujeito a ações biológicas, químicas, físicas e geológicas (CAMPOS, 2015).

O MOHID é uma plataforma de simulação hidrodinâmica e transporte de constituintes em suspensão e solução, sendo utilizado como ferramenta de pesquisa, quanto em projetos de consultoria. Foi utilizado em diversos estuários na costa de Portugal, podendo citar vários como Lima, Tejo, Mira, Minho e Guadiana e Lagoas Costeiras como Ria de Avieiro e Ria Formosa (MARTINS et al., 2000; INAG, 2001). Diversos estuários também foram modelados na França, Holanda e Irlanda com modelos desenvolvidos por Leitão (1997) e Neves e Cancino (1999). Em mar aberto vale a pena citar os modelos feitos analisando correntes marinhas tanto na costa de Portugal (COELHO *et al.*, 1994) quanto ao longo da Plataforma Continental no Atlântico Europeu (NEVES *et al.*, 1998).

No Brasil vale a pena ressaltar como o MOHID auxiliou Sampaio (2008) no gerenciamento da costa do estuário de Santos, Precioso *et al.*; (2008) avaliaram a qualidade da água na Lagoa do Vigário (RJ), Souza (2011) contribuiu no estudo da intrusão salina no Rio São João, Campos (2015) foi auxiliada a entender os efeitos de um possível descarte da água de lavagem na bacia de Campos.

Os modelos foram desenvolvidos por uma equipe técnica do Instituto Superior Técnico de Lisboa em 1985 juntamente com a empresa Hidromod com significantes contribuições de pesquisadores, de alunos de mestrado e doutorado da área ambiental. Seu aprimoramento é uma constante desde então, permitindo hoje uma plataforma uni, bi e tridimensional (Campos, 2015; JULIANO *et al.*, 2012). Sua programação é feita em ANSI FORTRAN 95 e tendo em seu sistema mais de 40 módulos, somando mais de 150.000 linhas de programação (CAMPOS, 2015; JULIANO *et al.*, 2012; MIRANDA *et al.*, 2000; PESSANHA, 2012).

O programa utilizado MOHID STUDIO e segundo Pina *et al.*, é um pacote desenvolvido pela Action Modulers que tem dados pré e pós-processamento para a plataforma MOHID com uma interface gráfica amigável e estende-se a aplicabilidade do MOHID com a integração de interface de OpenMI (, Braunschweig *et al.* 2012).

Metodologia

Considerando um caso típico, em que o poço que foi perfurado foi dividido em 5 fases, mas somente 3 fases usariam o colchão espaçador com 10 barris de volume morto em cada uma, então teríamos de 30 barris (bbl) de produto a ser descartado. A simulação computacional foi feita do descarte de somente uma fase por vez para analisar melhor os resultados. Na simulação foi considerado apenas o agente controlador de densidade do fluido (BaSO_4) usado para aumentar a densidade, que constitui 98% da parte sólida do sistema e que terá grande contribuição para a modelagem devido a ser a parte que se depositará no leito marinho.

Inicialmente o desenvolvimento do módulo de transporte lagrangiano do MOHID foi feito para ser acoplado a um modelo hidrodinâmico bidimensional, resolvendo em pequenas

profundidades equações primitivas usando aproximação hidrostática, simulando dessa forma apenas objetos flutuando sobre a água à deriva e com seu aprimoramento houve uma real necessidade de aprimorar seus mecanismos, passando assim a fazer simulações mais complexas como estudo de qualidade de água (determinando em áreas específicas de domínio, o tempo de residência de massas d'água) e tais como emissões de sedimentos, de grandes massas de poluentes e de efluentes de águas residuais. Em sua terceira fase de aprimoramento, foi generalizado o sistema de coordenadas do mesmo, sendo possível obter um modelo de partículas a modelos hidrodinâmicos 2D e 3Ds, sendo dividido em geração, transporte e eliminação de partículas (CAMPOS, 2015; NEVES, 1985 e IST, 215a).

Segundo Juliano (2002), o MOHID tem o módulo hidrodinâmico para análise tridimensional e os módulos de transporte euleriano e também o lagrangiano, este sendo útil para a simulação onde se tem gradientes acentuados. O lagrangiano faz uso do conceito de traçador, que tem a sua principal característica é a sua posição no espaço (x,y,z). O traçador se é utilizado em diversas áreas, pois o químico pode chamar de acordo com seu estudo como por exemplo uma molécula, para o biólogo seja por exemplo de células até animais de grande porte.

A abordagem lagrangiana associa partículas emitidas em pontos conhecidos do domínio, tendo a trajetória de cada partícula calculada de acordo com campo de velocidades que é dado pelo modelo hidrodinâmico acoplado, sendo o campo de concentrações a função da densidade da partícula em cada célula de malha (CAMPOS, 2015; LEITÃO; 1996).

Para a análise quantitativa no transporte de sedimentos, tem que previamente ter um conhecimento de a velocidade de sedimentação das partículas dos mesmos. Muitas tentativas têm sido feitas para a sua previsão, mas a maioria das pesquisas relevantes aplicam-se apenas às partículas esféricas. Basicamente, existem dois tipos de métodos de previsão de velocidade de sedimentação de qualquer das partículas esféricas ou não esféricas. Uma é a solução analítica de Stokes que é aplicável apenas para partículas número de Reynolds, $Re = wD / \nu \leq 1$, sendo w = velocidade de sedimentação de uma partícula, d = diâmetro da partícula e ν = viscosidade cinemática. Cheng (1997), onde, $\Delta = (\rho_S - \rho) / \rho$, sendo ρ = densidade do fluido, ρ_S = densidade das partículas, g = aceleração da gravidade. Infelizmente, (1) só é válida para $Re \leq 1$.

$$w = \frac{1}{18} \frac{\Delta g d^2}{\nu}$$

Segundo Van Rijn (1989), só poderemos utilizar a equação abaixo se as partículas tiverem diâmetro menores que 0,01cm ($d < 0.01 \text{ cm}$). Foi admitido que o tamanho das partículas de baritina foi de 96 microns = 0.0096cm, sendo, então a equação pode ser utilizada para o cálculo da velocidade de sedimentação e o número de Reynolds ($Re = WD / \nu$) deu o resultado de 0.90816, ou seja menor que 1 validando a equação para o cálculo da velocidade de sedimentação da baritina.

Resultados e Discussão

O Sulfato de bário (BaSO_4) ou ‘‘baritina’’ tem sua densidade em cerca de 4.33g/cm^3 e tamanho, podendo variar de 0.5 a 70 microns e a sua utilização é controlada pelo órgão ambiental (IBAMA) que estipula requisitos mínimos para que seja utilizada nos fluidos a serem bombeados, onde para cada lote: Para preparação de fluido a concentração de cádmio limitada em no máximo 3mg/Kg e a de mercúrio limitada em 1mg/Kg . O ensaio deverá ser realizado por meio dos métodos US EPA 3050B (Digestão Ácida da Amostra), US EPA 6010C (Determinação de Cádmio), US EPA 7471B (Determinação de Mercúrio). Sendo assim, fica proibido o uso de lotes de baritina que não atendam aos limites descritos. (BRASIL, 2014), de acordo com as novas exigências determinadas pelo órgão ambiental.

A extração se dá como minério e utilizado em várias indústrias e principalmente na indústria do petróleo, onde a utilização do Bário nesta forma chega a 80% para fazer lama de perfuração de alta densidade. O Sulfato de Bário também é utilizado para fazer tintas, telhas, tijolos, vidro, borracha e as vezes usado por médicos para realizar exames e tirar fotografias de raios-X do estômago e intestino. (U.S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES, 2007)

O tempo que o Bário vai permanecer no ar, terra ou água, vai depender da forma que ele é liberado para esses meios. Os compostos de bário que não dissolvem bem em água, como o Sulfato de Bário e o Carbonato de Bário (BaCO_3) podem persistir por um grande tempo no ambiente. Os compostos de bário, tais como cloreto, nitrato ou o hidróxido se dissolvem rapidamente na água e normalmente não duram por muito tempo. O bário deses compostos dissolvidos na água reage rapidamente com sulfatos ou carbonatos que são encontrados

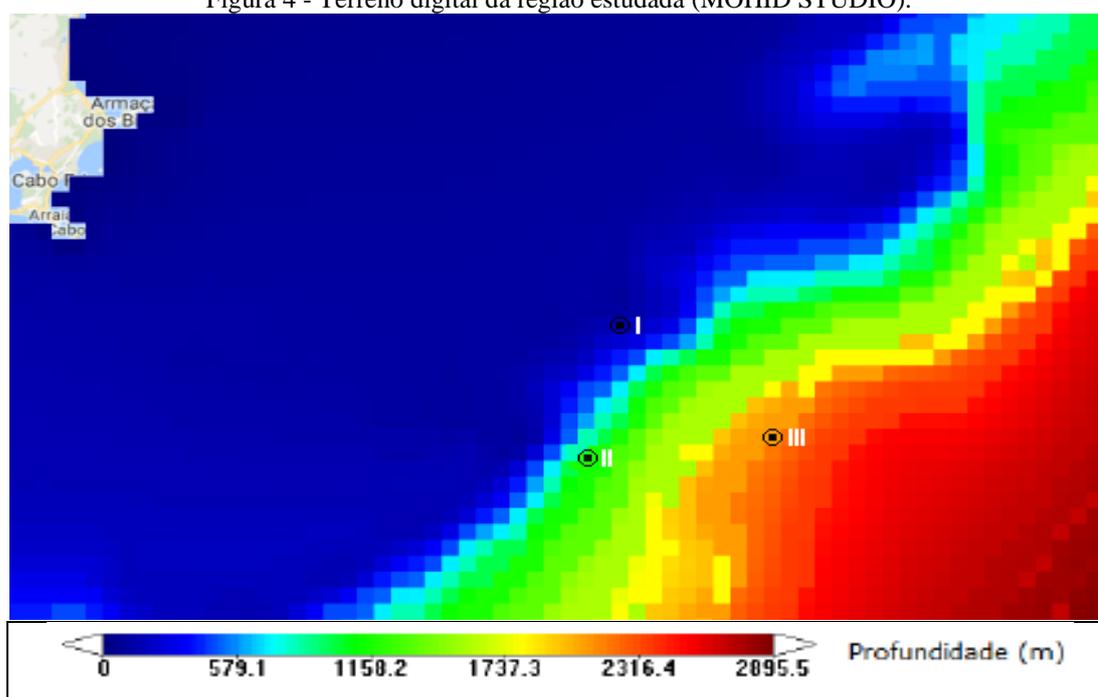
naturalmente na água, se transformando nas formas mais estáveis que são: Sulfatos ou carbonatos de bário. Essas formas são as mais comuns encontradas no solo e na água. (U.S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES, 2007)

Apresenta-se a seguir a simulação de três lançamentos de colchões espaçadores em regiões onde se encontram plataformas explorando campos de petróleo, efetuando assim as operações de perfuração e de cimentação desses poços, o que geraria resíduo de colchão espaçador, entre outros já citados (THOMAS, 2011).

O volume de cada colchão espaçador descartado na simulação foi de $1,59 \text{ m}^3$ aproximadamente. Para as simulações foram consideradas que os colchões foram lançados a 20 metros da superfície com a vazão de $31,8 \text{ m}^3/\text{h}$. Para a simulação foi assumido o diâmetro da partícula de baritina se aglomeraram e obtiveram um diâmetro médio de $740 \mu\text{m}$ e como a densidade da baritina é $4.33 \text{ g}/\text{cm}^3$ resultando em uma velocidade de sedimentação de $9.928 \times 10^{-3} \text{ m}/\text{s}$. (PRÓPRIO AUTOR)

Foram feitas simulações em 3 regiões com profundidades diferentes para fazer uma análise sobre a deposição da baritina no leito oceânico. As áreas das simulações foram sinalizadas como I, II e III conforme a Figura 4 abaixo:

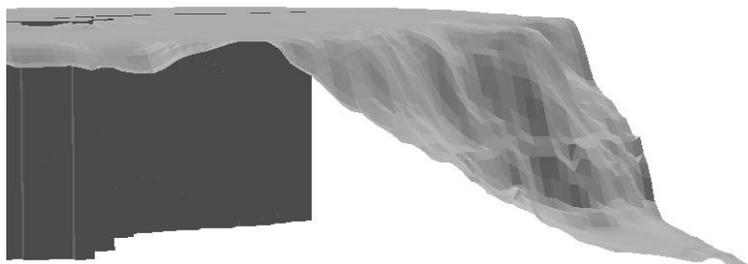
Figura 4 - Terreno digital da região estudada (MOHID STUDIO).



Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2016)

A área em cinza se refere a uma representação gráfica 3D do fundo do mar. Seguem 3 diferentes ângulos para melhor entendimento da área a ser simulada que pode variar desde 150-200 metros até 2100 metros. A área estudada localiza-se na baía de Campos que compreende o litoral do estado do Rio de Janeiro

Figura 5 - Vista lateral da área da simulação.



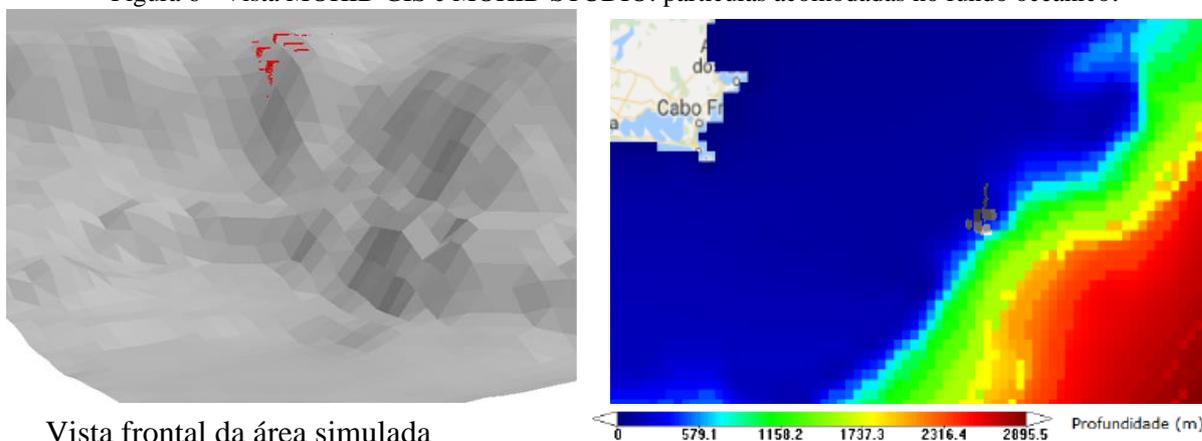
Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2016)

A vista de cima da área onde foi feita a simulação será adotada para mostrar as simulações devido a mostrar a amplitude do espalhamento das partículas.

A simulação identificada por I foi feita com uma lâmina d'água (profundidade do mar) de aproximadamente 200 metros, a identificada por II foi feita em aproximadamente 1000 metros de profundidade e a identificada por III foi feita em aproximadamente 2000 metros de profundidade.

Simulação ponto I – Profundidade aproximadamente 200 metros.

Figura 6 - Vista MOHID GIS e MOHID STUDIO: partículas acomodadas no fundo oceânico.

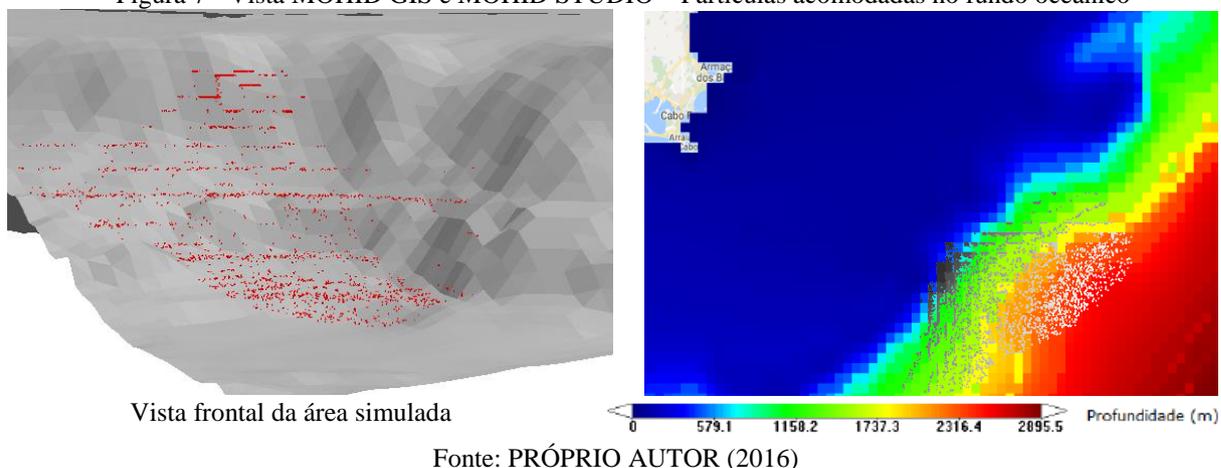


Vista frontal da área simulada

Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2016)

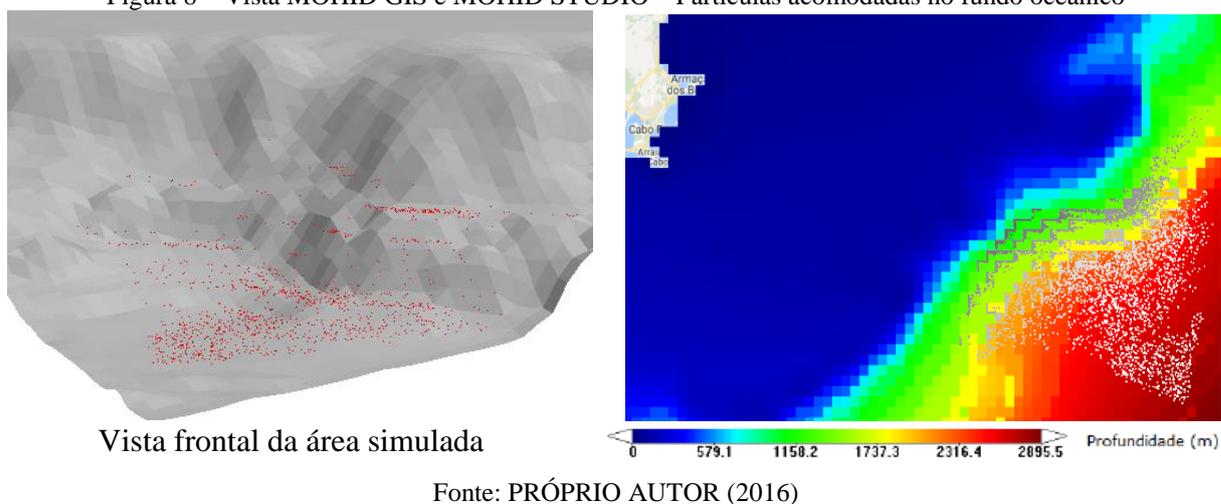
Simulação ponto II – Profundidade aproximadamente 1000 metros.

Figura 7 - Vista MOHID GIS e MOHID STUDIO – Partículas acomodadas no fundo oceânico



Simulação ponto III – Profundidade aproximadamente 2000 metros.

Figura 8 – Vista MOHID GIS e MOHID STUDIO – Partículas acomodadas no fundo oceânico



Fazendo uma análise para sabermos de quanto foi a deposição de baritina no fundo do mar, foi analisado a figura 14, pois foi onde houve uma maior dispersão das partículas de baritina e sabendo-se que a malha utilizada foi de 3 x 3 Km, o resultado de espalhamento foi que as partículas de baritina ocuparam aproximadamente 4200 Km² e com uma deposição de apenas 0.25mg em 1m²

Considerando que ocorrerão perfurações de poços de petróleo próximos uns dos outros, ocorrerá que a área afetada certamente ocorrerão acumulações sucessivas do sulfato de bário,

Em estudos foi identificado bioacumulação de bário em determinadas plantas e alguns organismos aquáticos, mas devem-se realizar mais estudos sobre essa bioacumulação em plantas e animais terrestres e sobre a biomagnificação do bário nas cadeias alimentares terrestres e aquáticas. (U.S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES, 2007).

O Bário mesmo em baixas concentrações é considerado muito tóxico quando está no meio ambiente e não é essencial aos seres vivos, pois pode ter efeitos acumulativos. (CUNHA & MACHADO, 2004)

Conclusão

O estudo tem sua importância ampliada devido aos novos procedimentos exigidos pelo órgão ambiental com colchões espaçadores preparados nas sondas de perfuração. Tais procedimentos exigem a retirada de amostra do fluido já preparado instantes antes de serem bombeados para o poço de petróleo e que seja feito teste de ecotoxicidade aguda nas amostras. Anteriormente os testes de ecotoxicidade eram pedidos pelo IBAMA para permitir o descarte de acordo com os limites permitidos e agora estão sendo demandados para todas as operações. Independente dos resultados de ecotoxicidade, com a realização desse trabalho passamos a ter simulações da partícula sólida mais abundante desses fluidos e suas tendências de acordo com as correntes marítimas e diferentes profundidades.

As simulações feitas nas áreas I, II e III servirão de exemplo para conhecimento das consequências do lançamento de rejeitos de colchão espaçador durante as atividades petrolíferas. Foi possível fazer a reprodução do cenário do descarte do fluido em questão através do módulo lagrangiano do software MOHID acoplado as soluções hidrodinâmicas em diferentes profundidades para melhor entendimento da possível área afetada pelos resíduos sólidos descartados no fluido.

Por meio da modelagem computacional é possível concluir através da modelagem computacional que o descarte em profundidades menores, resulta em menor dispersão das partículas, obtendo assim uma maior concentração de resíduos quando comparada ao lançamento realizado em locais com maior profundidade. Tal fato decorre do tempo que as partículas permanecem em suspensão, pois quanto maior tempo, maior será a dispersão devido

as correntes marítimas. Este resultado, pode ser conjugado ao dos testes ecotoxicidade e para subsidiar a decisão de liberar ou não o descarte do fluido em questão em alto mar, porém tal tomada de decisão depende exclusivamente do órgão ambiental (IBAMA). Apesar do transporte do resíduo para o continente demanda queima de combustível, proporciona risco de derrame acidental do material durante o trajeto, exigindo tratamento posterior para disposição tem que ser considerado a quantidade de mercúrio na baritina, pois este é bioacumulador e tóxico.

O potencial de contaminação do ambiente com mercúrio e estrôncio ainda necessita de regulamentação para que a decisão não implique em danos não só ecossistêmicos mas também à saúde humana. O modelo auxilia em ações de gestão no caso de acidentes, pois o problema seria a bioacumulação (soma das sucessivas absorções de um poluente feitas por via directa, ou via alimentar, por espécies aquáticas) e a bioconcentração (aumento imediato da densidade de um poluente assim que passa da água para um organismo aquático).

Seria importante a realização de testes de ecotoxicidade dos colchões espaçadores tanto aguda quanto crônica, para então permitir a comparação com a quantidade a ser descartada e deposição no leito marinho, para então emitir recomendações de limites seguros para descarte oceânico ou transporte para o continente.

Referências Bibliográficas

AMARAL, K. J. **Estuário do Rio Macaé: Modelagem Computacional como ferramenta para o Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos** [Rio de Janeiro], 2003. BRASIL, 2014. Ministério do Meio ambiente.

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Minuta para Consulta Pública da Nota Técnica CGPEG/DILIC/IBAMA n° XX/14**. Novas diretrizes para uso e descarte de fluidos de perfuração e cascalhos, fluidos complementares e pastas de cimento nos processos de licenciamento ambiental dos empreendimentos marítimos

de exploração e produção de petróleo e gás natural. Disponível em: <<https://www.ibama.gov.br/licenciamento/petroleo/procedimentos>>. Acesso em 25 fev. 2014.

BONGANHA, Carlos André; Guiguer Jr, Nilson; Pereira, Sueli Yoshinaga; Oliveira, Luciana Camargo de; Ribeiro, Maria Lúcia. Conceitos e fundamentos da modelagem matemática para gerenciamento de recursos hídricos subterrâneos. **Analytica**, 30, 2007.

CAMPOS, L. F., LUGON JR, J., TELLES, W. R., RODRIGUES, P. P. G. W. Estudo da geração de resíduos nas operações de perfuração e cimentação durante a construção de poços marítimos de óleo e gás. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**. Essentia Editora, in press.

CANTELMO, Frank R.; TAGATZ, M. E.; RAO, K. Ranga. Effect of barite on meiofauna in a flow-through experimental system. **Marine environmental research**, v. 2, n. 4, p. 301-309, 1979.

CARNEY, L. "Method of using a spacer fluid for spacing drilling muds and cement." U.S. Patent No. 3,850,248. 26 Nov. 1974.

Cheng, N. S. (1997). "A simplified settling velocity formula for sediment particle." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 123(2), 149-152.

CUNHA, F.G.; MACHADO, G. J. Estudos de geoquímica ambiental e o impacto na saúde pública no município de São Gonçalo do Piauí, estado do Piauí. Programa Nacional de Pesquisa em Geoquímica Ambiental e Geologia Médica ‘‘PGAGEM’’. Serviço Geológico do Brasil – CPRM. Brasil: DEPAT, 2004, 47p.

DE SOUZA, PAULO JUVÊNIO BERTA, and VALDIR LUIZ DE LIMA. "Avaliação das técnicas de disposição de rejeitos da perfuração terrestre de poços de petróleo." (2002).

DIAS, Gerônimo Joaquim; MARTINS, Renato Parkinson; DE AZEREDO COUTINHO, Álvaro Luiz Gayoso. **MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DO LANÇAMENTO DE REJEITOS DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA EM ÁGUAS PROFUNDAS**.

(DUTRA ,E.S.S. et al., 2004), (Naccache,M.F. et al., 2004), (SouzaMendes, P.R. et al., 2004), (Souto,C.A.O. et al., 2004), (Martins,A.L.andMiranda, C.R. et al., 2004), Analysis of interface between Newtonian and non-Newtonian fluids inside annular eccentric tubes, Proc.2004 ASME/IMECE, paper IMECE2004-59335.

FERNANDES, R. M. A. S. **Modelação Operacional no Estuário do Tejo**. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico; Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2005.

IRITANI, M.A. **Modelação matemática tridimensional para a proteção das captações de água subterrânea**. 1998. 200 f. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998. *apud* BONGANHA, 2007.

IST (Instituto Superior Técnico); **Sistema de Modelos MOHID – Breve Descrição**. Disponível em: < <ftp://ftp.mohid.com>>. Acesso em 04 jul. 2015a.

IST (Instituto Superior Técnico); **Hydrodynamic Module - Mohid User Guide**. Disponível em: < <http://aquageo.es/wp-content/uploads/2012/10>>. Acesso em 17 jul. 2015b.

JULIANO, Maria Manuela Fraga et al. Aplicação da Plataforma MOHID para simulação computacional de deriva oceânica de petróleo na bacia de Campos-RJ. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, v. 6, n. 1, p. 161-172, 2013.

LIMA, Tiago França Melo de. **TerraME GIMS – Uma interface gráfica para a descrição de modelos ambientais para a plataforma TerraME**. 2010. 98 f. Dissertação de mestrado (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

LIMA, E. B.; RODRIGUES, P. P. W. G.; SILVA NETO, A. J.; MESA, M. I.; SANTIAGO, O. L.; LUGON JUNIOR, J. **Redes Neurais na Obtenção dos Parâmetros de um Modelo Computacional do Estuário do Macaé (Artigo)**. Congresso Ibero Latino-Americano de Modelagem Computacional; Armação de Búzios/RJ, 2010.

MARIA, ANU. **Introduction to modeling and simulation.** 1997.

MARTINS, F.; LEITÃO, P.; SILVA, A.; NEVES, R. 3D MODELING IN THE SADO ESTUARY USING A NEW GENERIC VERTICAL DISCRETIZATION APPROACH. OCEANOLOGICA ACTA, 2000.

MIRANDA, R.; BRAUNSCHWEIG, F.; LEITAO, P.; NEVES, R.; MARTINS, F.; SANTOS, A. **Mohid 2000, A Costal integrated object oriented model.** WIT Press, Hydraulic Engineering Software VIII, 2000.

NGUYEN, T.C.; MISKA, S.; YU, M.; TAKACH, N Dynamic Barite SAG in Newtonian Oil Based fluido, SPE 124137, SPE424, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Lousiana, 2019.

NEVES, R. J. J.; **Étude Expérimentale et Modélisation Mathématique des Circulations Transitoire et Résiduelle dans l' Estuaire du Sado.** Ph.D. Thesis, University of Liège (Belgium), 1985.

NEVES, R.; COELHO, H.; LEITÃO, P.; MARTINS, H.; SANTOS, A. **A numerical investigation of the slope current along the western European margin.** In: BURGANO, V.; KARATZAS, G.; PAYATAKAS, A.; BREBBIA, C.; GRAY, W.; PINDER, G. (Ed.). In: COMPUTACIONAL METHODS IN WATER RESOURCES, 12., v.2, p. 369-376, 1998.

OROFINO, Carlos Alberto; DUTRA, Eduardo SS; NACCACHE, Mônica F. Estudo da Interface entre Fluidos Newtoniano e Viscoplástico.

PARCEVAUX, Philippe, and David B. Jennings. "Aqueous spacer composition compatible with drilling muds and cement slurries." U.S. Patent No. 5,101,902. 7 Apr. 1992.

PESSANHA, C. M. D.; **Modelagem computacional aplicada à gestão sanitário-ambiental da lagoa Imboassica-RJ.** Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental).

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense. Campos dos Goytacazes/RJ, 2012.

PRECIOSO, Carlos Henrique Oliveira et al. Avaliação da variabilidade de parâmetros ambientais numa lagoa urbana (Campos dos Goytacazes, RJ) com auxílio do sistema MOHID. Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego, v. 4, n. 2, p. 185-204, 2010.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. D. **Modelos hidrológicos para gestão ambiental**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000. 60 p.

SODRÉ, ULYSSES. **Modelos matemáticos**. Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2007.

THOMAS, J.E.; **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 2001. 271 p.

TROLLI, B Vallandro, et al. "Análise de sedimentos marinhos de perfuração de poços petrolíferos." Salão de Iniciação Científica (15.: 2003: Porto Alegre). Livro de resumos. [recurso eletrônico]. Porto Alegre: UFRGS, 2003. (2003).

U.S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES - Agency for Toxic Substances and Disease Registry. **Toxicological profile for barium and barium compounds**. Atlanta, 2007

WILSON, William N., et al. "Spacer fluids." U.S. Patent No. 5,030,366. 9 Jul. 1991.