INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
FLUMINENSE
Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica
Ministério da Educação

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

MODALIDADE PROFISSIONAL

SOLUÇÕES PARA O VOLUME RESIDUAL GERADO DURANTE A LIMPEZA DE UNIDADES DE PREPARO DE PASTA DE CIMENTO PARA OPERAÇÃO DE CIMENTAÇÃO DE POÇOS DE ÓLEO E GÁS

LETÍCIA FERRAÇO DE CAMPOS

MACAÉ/RJ

2015

LETÍCIA FERRAÇO DE CAMPOS

SOLUÇÕES PARA O VOLUME RESIDUAL GERADO DURANTE A LIMPEZA DE UNIDADES DE PREPARO DE PASTA DE CIMENTO PARA OPERAÇÃO DE CIMENTAÇÃO DE POÇOS DE ÓLEO E GÁS

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 Desenvolvimento e Sustentabilidade.

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

MACAÉ/RJ

2015

Campos; Letícia Ferraço de, 2015

Soluções para o volume residual gerado durante a lavagem de unidades de preparo de pasta de cimento para operação de cimentação de poços de óleo e gás - Instituto Federal Fluminense – Macaé (RJ)

ISBN XX-XXX-XXXX-X

Nome do impressor/Editor

Local e data da impressão

Dissertação intitulada SOLUÇÕES PARA O VOLUME RESIDUAL GERADO DURANTE A LIMPEZA DE UNIDADES DE PREPARO DE PASTA DE CIMENTO PARA OPERAÇÃO DE CIMENTAÇÃO DE POÇOS DE ÓLEO E GÁS, elaborada por Letícia Ferraço de Campos, e apresentada publicamente perante a Banca Examinadora, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental do Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental linha de pesquisa Desenvolvimento e Sustentabilidade, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense - IFF.

Aprovado em _____

Banca Examinadora:

_____

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

_____

Marcos Antonio Cruz Moreira, D.Sc - **IFF**
(Doutor em Engenharia Elétrica – **UFRJ**)

_____

Ramiro Joaquim de Jesus Neves, D.Sc - **Universidade de Lisboa**
(Doutorado em Ciências Aplicadas - **Université de Liège, ULG, Bélgica**.)

_____

Pedro Paulo Gomes Watts Rodrigues, D.Sc - **UERJ**
(Doutor em School of Marine Science and Techonology - **Newcastle University, NCL, Inglaterra**)

_____

Wagner Rambaldi Telles, D.Sc - **UERJ**
(Doutor em Modelagem Computacional – **UERJ**)

AGRADECIMENTOS

À minha família e ao Manuel da Costa pelo apoio e pela paciência sempre demonstrada durante todo o trabalho.

Ao orientador Prof. Jader Lugon Júnior pela ativa orientação e pelo constante incentivo que marcaram todo o curso deste trabalho de pesquisa.

Ao Prof. Ramiro Neves e ao Guilherme Franz que foram imprescindíveis para a modelagem computacional inserida no contexto deste estudo.

Aos colegas de trabalho, em especial ao Marcelo Sledz, Leonardo Marinho, Diego Brasil, Jan Aslan, Rodrigo Chuvas, Thiago Piedade e Wllisses Menezes, pelo contínuo incentivo e pelas relevantes contribuições a este trabalho.

Aos amigos Saulo Vidal, André Mengatti, Manon Perdomo, Camila Luna, Wilker Silveira e Sávio Januário pelo apoio prestado durante a realização deste trabalho.

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.

RESUMO

Este trabalho descreve as atividades de perfuração e cimentação durante a construção de poços marítimos de óleo e gás citando os resíduos gerados em cada etapa, bem como apresenta-se a implementação de uma simulação numérica do descarte em mar aberto do volume residual de água de lavagem gerado durante as operações de cimentação. Existem duas opções possíveis de disposição para esses resíduos: descarte em mar aberto ou tratamento seguido de destinação final em terra. Os critérios que o gerador deve atender em ambas as opções de acordo com cada resíduo são descritos seguindo as orientações do IBAMA, órgão ambiental que regula a atividade. O trabalho de modelagem apresentado foi realizado com o emprego do software MOHID WATER capaz de prever o comportamento da parte sólida do resíduo em questão na coluna d'água e sua acomodação no leito marinho. Todo estudo foi realizado através da abordagem lagrangeana onde a parte sólida do resíduo foi representada por partículas e a fase contínua pelo próprio ambiente receptor.

Palavras-chave: Perfuração de poços de petróleo. Cimentação de poços de petróleo. Descarte de resíduos. Ambiente Marinho. Modelagem computacional. MOHID WATER. Modelo Lagrangeano.

ABSTRACT

This paper describes drilling activities and cementation during the construction of offshore wells for oil and gas citing the waste generated at each stage as well as presenting the implementation of a numerical simulation of offshore disposal of residual washing water volume generated during the cementing operations. There are two possible options available for these wastes: disposal in open water or treatment followed by disposal on land. The criteria that the generator must meet in both options according to each residue are described following the guidelines of IBAMA environmental agency that regulates the activity. The presented modeling work was done with the employment of MOHID WATER software able to predict the behavior of the solid part of the waste in question in the water column and accomodation on the seabed. The study was conducted through the Lagrangian approach where the solid part of the residue was represented by particles and the continuous phase by its receiving environment.

Keywords: Oil well drilling. Oil well Cementing. Waste disposal. Marine Environment. Computational modeling. MOHID WATER. Lagrangian Model.

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..... 8
Figura 3 - Ilustração dos padrões genéricos de assentamento do cascalho das fases de perfuração com fluidos de base água (a) e de base não aquosa (b)..... 12
Figura 4 - Espessura de cascalho aderido a fluido aquoso acumulados no leito marinho.....13
Figura 5 - Espessura de cascalho aderido a fluido não aquoso acumulados no leito marinho..... 13
Figura 6 - Perfil do poço exibindo seus revestimentos.....17
Figura 7 - Preparo de pasta de cimento para operações de início de poço..... 21
Figura 8 - Preparo de pasta de cimento no *batch mixer* para as operações de cimentação de revestimento intermediário, de produção e *liner*..... 22
Figura 9 - Tanque para armazenamento e transporte de resíduos de cimentação..... 23

ARTIGO CIENTÍFICO 2

Figura 1 - Cálculo da velocidade média das partículas. 35
Figura 2 - Comparação entre o critério da granulometria e o critério da atividade. 36
Figura 3 - Terreno digital da batimetria região estudada, via interface GIS do MOHID. 38
Figura 4 - Trajetória das partículas após oito horas do início do descarte..... 39
Figura 5 - Trajetória das partículas após vinte e oito horas do início do descarte. 39
Figura 6 - Trajetória das partículas após dois dias do início do descarte. 40
Figura 7 - Acomodação das partículas no leito oceânico do domínio estudado. 40
Figura 8 - Vista superior da acumulação das partículas no leito marinho. 41

LISTA DE QUADROS

ARTIGO CIENTÍFICO 1

Quadro 1 - Definições de tipos de fluidos 5
Quadro 2 - Resíduos das operações de perfuração e cimentação 6
Quadro 3 - Critérios para descarte de fluidos de perfuração. 14
Quadro 4 - Critérios para descarte de cascalho associado a fluidos de perfuração. 15
Quadro 5 - Resíduos com descarte proibido pelo IBAMA. 20

ARTIGO CIENTÍFICO 2

Quadro 1 - Resíduos das operações de perfuração e cimentação. 30
Quadro 2 - Volume gerado de cascalhos e água de lavagem durante a construção de um poço. 31
Quadro 3 - Principais módulos do MOHID WATER. 33

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS viii
LISTA DE QUADROS ix
SUMÁRIO x
APRESENTAÇÃO 1
ARTIGO CIENTÍFICO 1 4
Resumo 4
Abstract 4
Operação de Perfuração 7
Resíduos gerados durante a Operação de Perfuração 10
Operação de Revestimento e Cimentação 16
Resíduos gerados na Operação de Cimentação 19
Conclusão 24
Referências Bibliográficas 25
ARTIGO CIENTÍFICO 2 29
Resumo 29
Abstract 29
Introdução 30
Metodologia 34
Resultados e Discussão 37
Conclusão 41
Referências Bibliográficas 43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 46

APRESENTAÇÃO

O processo de exploração e produção de petróleo compreende as etapas da pesquisa, perfuração e produção. Na etapa da 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. Em seguida passa-se à etapa da perfuração que confirma ou não a existência de petróleo, havendo sucesso, inicia-se a terceira etapa que consiste na construção e desenvolvimento do poço (SCHAFFEL, 2002).

Segundo Veiga (2010) 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. Quando um poço é perfurado, fluidos de perfuração são bombeados a pressão elevada a fim de que ocorra o transporte de fragmentos da formação perfurada (cascalhos) até a superfície, para manter a estabilidade do poço e para refrigerar, lubrificar e apoiar parte do peso da coluna de perfuração (TOLDO Jr et al., 2009). Após a perfuração de cada seção do poço, o revestimento da fase é posicionado, sendo responsável pelo recebimento da instrumentação do poço e pela produção de óleo. O espaço entre o revestimento e a formação rochosa, ou seja, o anular é cimentado. De acordo com Silva et al. (2006) a cimentação garantirá a estabilidade mecânica do poço, bem como o isolamento entre as zonas produtoras de óleo e as formações adjacentes.

Como decorrência da atividade, surgem então inúmeros resíduos dentro das operações de perfuração e cimentação de poços. De acordo com Veltman *et al.* (2011) o fluido de perfuração é normalmente reprocessado e reciclado durante a perfuração. No entanto, quando as características do fluido são alteradas, o próprio fluido e os cascalhos gerados durante a perfuração, podem ser descartados para o ambiente ou transportados *onshore* para reprocessamento ou descarte. Na operação de cimentação, os resíduos gerados estão relacionados ao volume morto não bombeado dos tanques onde os fluidos são preparados e a água usada para a lavagem das partes internas do equipamento onde a pasta de cimento é preparada, sendo composta basicamente por água e resquícios sólidos de pasta de cimento.

Segundo Dias *et al.* (2004) todos esses resíduos carecem de uma destinação que minimize seus efeitos sobre o meio ambiente, tendo sempre em conta a sequência ora adotada

para avaliação da possibilidade de diminuição da quantidade de resíduos produzidos, bem como de aproveitamento destes: redução, reuso, reciclagem e disposição final.

No Brasil, o IBAMA marca o ano de 2014 com a divulgação de uma proposta de regulamentação específica para reger as atividades de perfuração e cimentação. A minuta de Nota Técnica Nº XXX/2014/CGPEG/DILIC/IBAMA, sem numeração definida pois se encontra em consulta pública no site do órgão ambiental, engloba as 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 óleo e gás natural (BRASIL, 2014). A ênfase do documento está nos processos de controle e monitoramento, de forma que seja possível que o órgão ambiental acompanhe o real resultado da atividade.

As novas diretrizes implicam na gestão responsável por parte das empresas através de restrições de descarte de efluentes baseada em toxicidade e presença de contaminantes a partir de avaliação feita pela empresa no momento da operação, limitando assim os tipos de resíduos com descarte permitido no ambiente marinho e consequentemente aumentando a quantidade de resíduos destinados em terra. De acordo com Pollis (2008) esta destinação apresenta grande dificuldade logística, visto o longo caminho trilhado pelos resíduos até seu ponto de destinação final além dos altos custos econômicos (transporte terrestre, limpeza de tanques e a destinação propriamente dita em aterros sanitários ou industriais) e ambientais (dados à geração de poluição atmosférica de todo o seu transporte e os possíveis impactos causados ao meio ambiente e à saúde humana decorrente dos possíveis métodos de destinações finais).

Ter ciência de como cada material gerado na construção dos poços se comportaria se exposto as condições locais de corrente, profundidade e temperatura no momento do seu descarte em mar aberto desempenharia um papel importante para a determinação da severidade e extensão, tanto imediata e temporal, dos efeitos de um possível descarte sobre o ambiente marinho. Segundo Melton *et al.* (2000) previsões feitas por modelagem computacional podem ser úteis para fornecer uma perspectiva sobre a extensão das concentrações dos componentes dos resíduos na coluna de água e prever a extensão da área onde ocorrem acumulações dos sólidos no fundo do mar.

O intuito deste trabalho é descrever a geração do resíduo de água de lavagem com objetivo de, através de uma completa revisão bibliográfica, encontrar possíveis soluções para a destinação deste resíduo da operação de cimentação de poços. A proposta inicial é apresentar, através da simulação computacional, a mensuração do real impacto dos fenômenos físicos que podem ocorrer com o descarte do resíduo água de lavagem em mar aberto, prevendo o comportamento da parte sólida do resíduo na coluna d'água e sua acomodação no leito marinho.

ARTIGO CIENTÍFICO 1

Estudo da geração de resíduos nas operações de perfuração e cimentação durante a construção de poços marítimos de óleo e gás.

Study of waste generation in the drilling and cementing operations during the construction of offshore oil and gas wells.

CAMPOS, L. F.[1]; LUGON JR, J.[2]; SLEDZ, M.[3]; RIBEIRO, D. B.[4]; ASLAN; J.[5]

[1] Mestranda em Engenharia Ambiental. Instituto Federal Fluminense/*Campus* Macaé
[2] D.Sc. em Modelagem Computacional. Instituto Federal Fluminense/*Campus* Macaé
[3] Químico de Petróleo. Petróleo Brasileiro S/A - E&P-CPM/CMP-SPO/SP/REVCIM
[4] Engenheiro de Equipamentos. Petróleo Brasileiro S/A - E&P-CPM/CMP-SPO/SP/REVCIM
[5] Engenheiro de Petróleo. Petróleo Brasileiro S/A - E&P-CPM/CMP-SPO/SP/REVCIM

Resumo

Este trabalho descreve as atividades de perfuração e cimentação durante a construção de poços marítimos de óleo e gás citando os resíduos gerados em cada etapa. Existem duas opções de disposição para esses resíduos: descarte em mar aberto ou tratamento seguido de destinação final em terra. São apresentados ainda os critérios que a indústria de óleo e gás, deve atender em ambas as opções de acordo com cada resíduo, seguindo as orientações do IBAMA órgão ambiental que regula a atividade.

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

Abstract

This paper describes drilling and cementing activities during the construction of offshore oil and gas wells citing the waste generated at each step. There are two possible options for these wastes: disposal in the open sea or treatment followed by final disposal on land. This work presents the criteria that the oil and gas industry must meet in both options according to each residue, following the guidelines of the IBAMA environmental agency that regulates the activity.

Keywords: Drilling oil well. Cementing oil well. Waste disposal. Marine environment.

Introdução

No Brasil, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA, instituído pela Lei nº 7.735, de 22 de fevereiro de 1989, vinculado ao Ministério do Meio Ambiente, é o órgão executor da política ambiental, e, portanto, responsável pela fiscalização e licenciamento ambiental dos empreendimentos marítimos de exploração e produção de óleo e gás, de acordo com a Resolução CONAMA n° 237. A Diretoria de Licenciamento Ambiental (DILIC), através da Coordenação-Geral de Petróleo e Gás (CGPEG), é a responsável pelo licenciamento ambiental desta atividade dentro do IBAMA (GAMA, 2014; POLLIS, 2008).

A minuta de Nota Técnica Nº XXX/2014/CGPEG/DILIC/IBAMA, até a presente data sem numeração definida, pois se encontra em consulta pública no site do órgão ambiental, traz a definição de cada tipo de fluido utilizado ou gerado durante as operações de perfuração e cimentação de poços de petróleo, conforme exposto no Quadro 1 (BRASIL, 2014).

Quadro 1 - 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 subsuperficie.
Fluidos Complementares	Denominação genérica dada a todos os demais fluidos utilizados durante a perfuração, cimentação e completação de poços.
Pasta de Cimento	Sistema de fluido cimentante contendo água de mistura e cimento que ao solidificar veda os espaços anulares ou o interior do poço, promovendo, assim, o seu isolamento e tamponamento.
Água de mistura	Veículo aquoso que serve como base para o preparo da pasta de cimento, podendo conter aditivos líquidos ou sólidos.

Fonte: Adaptação de Brasil (2014).

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

Quadro 2 apresenta os resíduos das operações de perfuração e os resíduos das operações de cimentação.

Quadro 2 - Resíduos das operações de perfuração e cimentação.

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).
Cimentação	Água de lavagem	Volume residual resultante da operação de lavagem das unidades de cimentação e do tanque de mistura.
	Água de mistura	Volume residual do veículo aquoso que serve como base para o preparo da pasta de cimento.
	Fluido Complementar	Volume residual de colchão espaçador.
	Pasta de Cimento	Volume residual de pasta de cimento

Fonte: Adaptação de Brasil (2014).

Dentro do processo de licenciamento das atividades de construção de poços de petróleo, condicionantes a serem atendidas deixam claro que é vetado o descarte em águas marinhas de fluidos de perfuração e complementares de base não aquosa, de pasta de cimento excedente nos tanques da unidade de perfuração e não bombeada para o poço, bem como dos efluentes gerados a partir do processo de limpeza do sistema de cimentação. Para os demais resíduos o descarte em alto mar é permitido e o IBAMA solicita diversos parâmetros de monitoramento como parte do processo de licenciamento de cada operação específica.

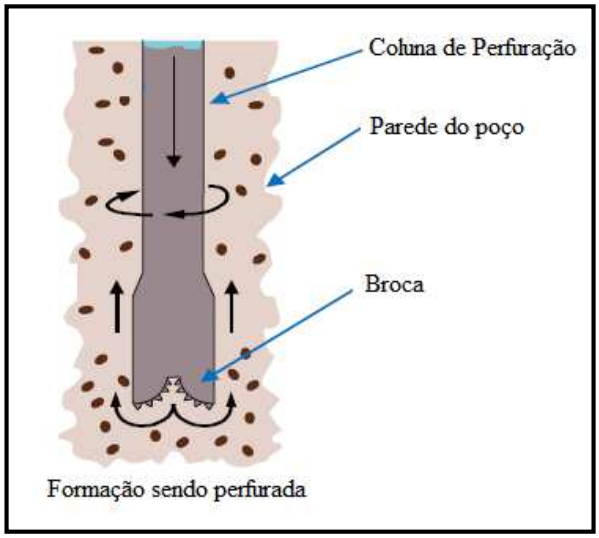
Neste artigo, através de revisão bibliográfica, pretende-se fazer uma breve descrição das atividades de perfuração e cimentação de poços, com ênfase na geração de volumes residuais em cada etapa; apresentando os critérios que a indústria de óleo e gás deve atender para dispor adequadamente cada resíduo.

Operação de Perfuração

Durante a 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. A torre de perfuração fica apoiada sobre uma superestrutura, onde se localiza a mesa rotativa. Esta mesa sustenta e comunica um 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. Quanto mais a broca se aprofunda, mais tubos de perfuração vão sendo encaixados em sua parte superior na superfície (SCHAFFEL, 2002; THOMAS, 2001).

A broca lança um fluido que circula pelo poço chamado fluido ou lama de perfuração. A Figura 1 ilustra a circulação do fluido durante a perfuração, destacando a suspensão e consequente remoção dos fragmentos da formação gerados, denominados de cascalhos.

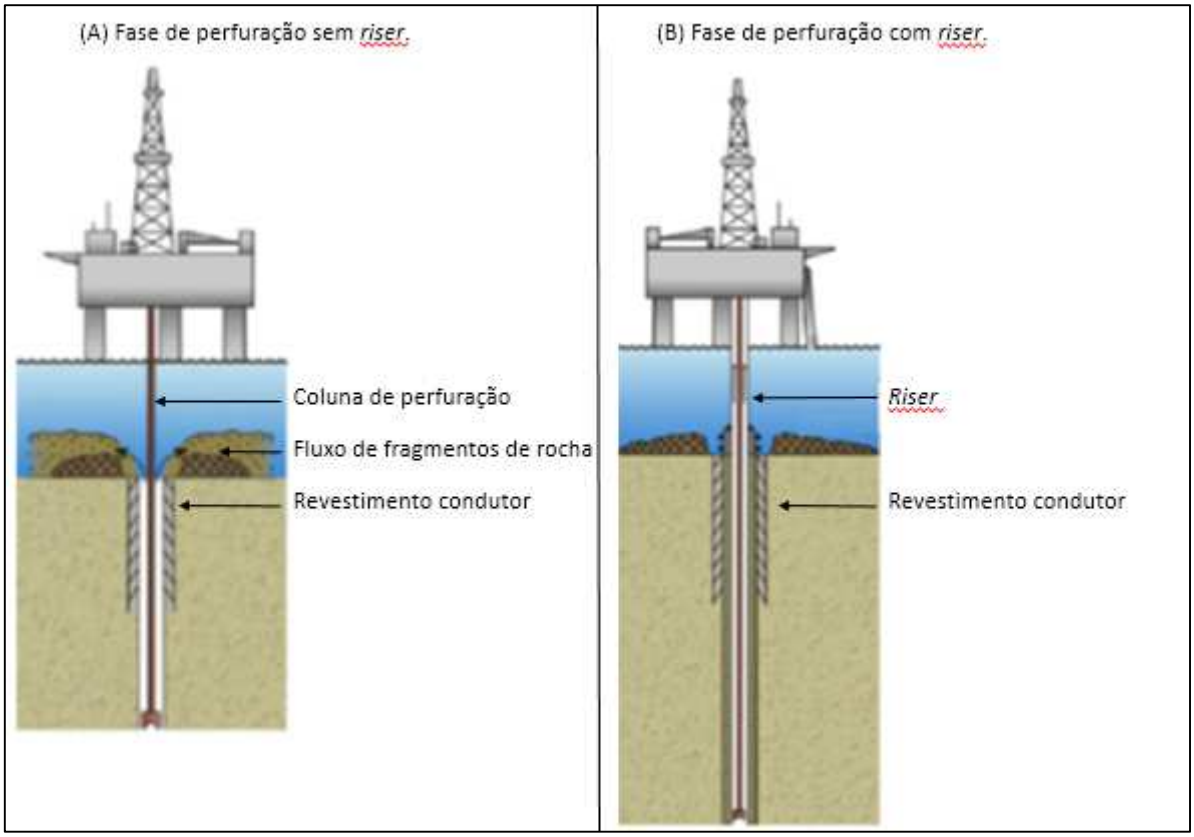
Figura 1 - Circulação do fluido de perfuração durante a perfuração.



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. De acordo com Veiga (2010) 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.

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



Fonte: Adaptação de VEIGA (2010).

Os fluidos de perfuração são formulações químicas que consistem de uma fase líquida contínua, na qual vários produtos químicos e materiais sólidos são adicionados com o objetivo de alcançar uma composição com propriedades específicas tais como densidade, viscosidade, salinidade, troca iônica dentre outras, necessárias para a perfuração de poços de óleo e gás (MENZIE, 1982; VEIGA, 2010).

Para Gettleson (1980), Holdway (2002) e Thomas (2001) os fluidos de perfuração possuem basicamente as seguintes funções:

- Limpar o fundo do poço dos cascalhos gerados pela broca e transportá-los até a superfície;
- Exercer pressão hidrostática sobre as formações, de modo a evitar o influxo de fluidos indesejáveis e estabilizar as paredes do poço;
- Resfriar e lubrificar a coluna de perfuração e a broca.

Segundo Veiga (2010) os fluidos podem ser classificados em dois tipos principais: fluidos de base aquosa e fluidos de base não aquosa. Os fluidos aquosos ou de base aquosa são aqueles que apresentam água como sua fase contínua. Estes fluidos consistem basicamente de 100% a 90% de água por volume, com a adição de componentes tais como barita, argila, lignosulfonatos, soda cáustica, polímeros e outros aditivos especiais. A base aquosa utilizada na formulação dos fluidos pode ser água industrial, água do mar ou soluções salinas saturadas.

Os fluidos de base não aquosa são formulados usando produtos orgânicos como fase contínua e água como fase dispersa. Os dois componentes principais dos fluidos base de óleo são: um composto orgânico ou oleoso, utilizado principalmente para a lubrificação, e sais de bário ($BaSO_4$), utilizados devido sua alta densidade que permite o controle hidrostático de pressão do poço (BAKKE *et al.*, 2013; KHONDAKER, 2000).

De acordo com Veiga (2010), em geral, a primeira fase de um poço é perfurada utilizando somente água como fluido de perfuração, mas também podem ser utilizados fluidos de base aquosa. Na medida em que o processo evolui para outras fases, já com o *riser*, vários outros tipos de fluidos são utilizados, incluindo fluidos de base não aquosa. Os fluidos de base não aquosa são mais caros do que os aquosos, porém ainda sim são economicamente compensadores, pois apresentam melhor desempenho. Proporcionam vantagens operacionais por apresentar elevada estabilidade química e resistência térmica (GAMA, 2014; KHONDAKER, 2000).

O êxito da construção de um poço e seu custo total dependem em grande parte das propriedades do fluido de perfuração escolhido. O custo do próprio fluido de perfuração é relativamente baixo, mas a escolha do fluido e manutenção das suas propriedades, enquanto ocorre a perfuração, influenciam diretamente no custo total do poço. Por exemplo, o número de dias necessários para alcançar a profundidade total do poço depende da taxa de penetração da broca e da prevenção de atrasos que podem ser causados por problemas durante a operação, fatores influenciados pelas propriedades do fluido de perfuração utilizado (CAENN *et al.*, 2011).

Resíduos gerados durante a Operação de Perfuração

Durante a perfuração de poços os principais rejeitos gerados são: cascalhos associados ao fluido de perfuração de base aquosa ou de base não aquosa e fluidos gastos de base aquosa ou não aquosa que não podem mais serem aproveitados. Na fase inicial da perfuração, antes da instalação do *riser*, todo o cascalho gerado é lançado sobre o assoalho oceânico. Para garantir a pequena interferência ambiental deste procedimento, os fluidos utilizados nestas fases são de base aquosa e apresentam muitas vezes composição simplificada, o que garante sua baixa toxicidade a organismos marinhos (GAMA, 2014).

Já em operações de perfuração com *riser*, após a perfuração, o fluido retorna do poço através do espaço anular entre a coluna de perfuração e o revestimento. Antes de chegar aos tanques da unidade marítima, o fluido usado passa por uma bateria de peneiras que têm a função primordial de separá-lo do cascalho agregado durante a perfuração. Para a separação de sólidos do fluido de perfuração emprega-se um sistema de separação constituído, basicamente, por peneiras, desareiador, dessiltador e, quando necessário, utiliza-se uma centrífuga. De acordo com Veiga (2010), após a separação do cascalho, o fluido ainda permanece com partículas coloidais e argilas finas, perdendo aos poucos suas propriedades originais.

Dependendo de cada situação operacional, estes fluidos podem ser reconstituídos e reutilizados ou então estocados para uso em outras locações. Segundo Ayers Jr. (1982), os fluidos de base aquosa podem se tornar inutilizáveis, durante o período de perfuração, em três situações típicas: quando ocorre a diluição do fluido, quando há necessidade de se trocar o sistema para perfurar formações específicas e, ao final da perfuração, quando não se pretende reaproveitá-lo. Normalmente, a cada 1 a 3 dias cerca de 16 a 32 m^3 de fluidos podem ser descartados. Porém, quando é necessária a troca de sistema, este valor pode chegar a 160 m^3.

A gestão típica desses resíduos inclui como opções a reutilização do fluido de perfuração, o descarte no mar ou disposição/tratamento em terra do fluido não reutilizável e dos cascalhos gerados. A escolha normalmente considera os regulamentos locais, avaliação ambiental e análise de custo/benefício.

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.

A possibilidade de descarte no mar dos resíduos de perfuração é restrita por requisitos regulamentares na maioria das áreas exploradas. Segundo OGP (2003) em grande parte dos países, volumes de fluidos de perfuração de base aquosa (não passíveis de reutilização) e cascalhos gerados durante operações com este tipo de fluido podem ser lançados ao mar depois de submetidos a tratamento por equipamentos de controle de sólidos. Já o descarte contínuo ou em batelada de fluidos de base não aquosa é proibido no mundo inteiro, exceto para o fluido associado ao cascalho, respeitando os limites máximos de massa de base orgânica a este aderida, definida em regulamentação específica.

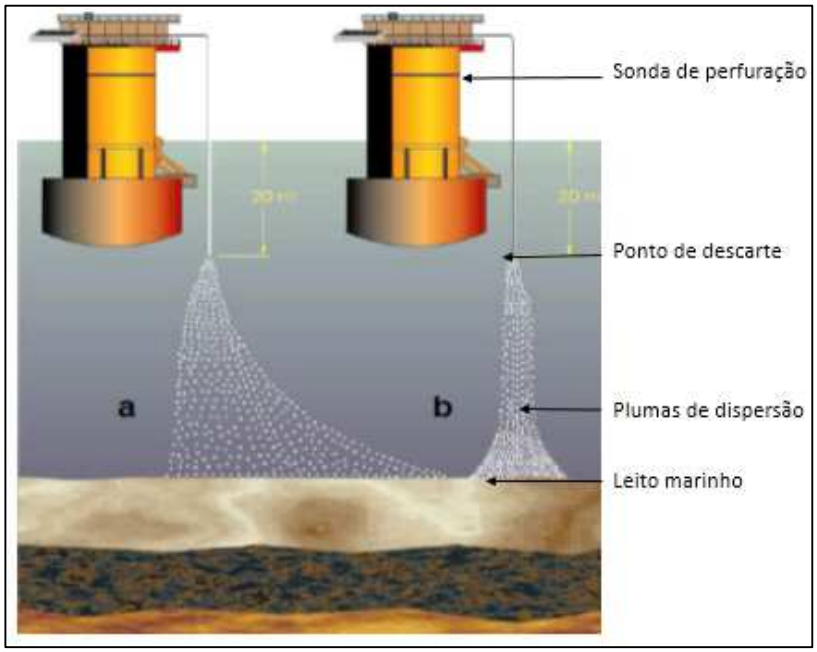
Estudos de revisão da literatura indicam que os impactos ambientais decorrentes do lançamento de cascalhos da perfuração nos ambientes marinhos podem ser de ordem física ou toxicológica (OGP, 2003). A ação física do ambiente pode ser de dois tipos: soterramento da comunidade e alteração da textura do sedimento devido à introdução de sólidos de granulometria e composição distinta da originalmente encontrada na superfície dos sedimentos no ambiente local. A ação ecotoxicológica está diretamente relacionada com a composição química dos fluidos de perfuração aderidos aos cascalhos e, se caracteriza pela capacidade das substâncias químicas presentes na formulação, causarem efeitos adversos para organismos vivos tais como: alterações fisiológicas, comportamentais ou em última instância, a morte (CAPP, 2001; GERRARD *et al.*, 1999; MONAGHAN *et al.*, 1980; VEIGA, 2010).

O impacto físico do descarte do resíduo de cascalho contaminado com fluido de perfuração pode ser previsto através da aplicação de modelagem computacional. O material injetado no ambiente marinho tende a formar plumas de dispersão características que derivam conforme as condicionantes ambientais predominantes, determinadas pelas condições de ondas, ventos, correntes e hidrografia da região. O processo de dispersão destes sólidos depende amplamente das condições ambientais (correntes, densidade, temperatura), bem como das propriedades do material (granulometria, densidade) e será determinante para a abrangência da área de impacto. Estudos indicam que os impactos identificados pelo descarte

do cascalho e fluido de perfuração atuam temporariamente na área em que se manifestam, que é localizada, ou seja: no entorno do ponto de descarte.

O descarte de cascalhos da perfuração com fluidos não aquosos, por exemplo, apresenta baixa capacidade de dispersão, devido à força de coesão dos sólidos com a base orgânica, o que leva a um rápido assentamento do material no assoalho oceânico, dentro de uma área mais restrita no entorno da plataforma, se comparada com os cascalhos gerados com perfuração com fluidos de base água como ilustra a Figura 3 (DIAS *et al*., 2004; OGP, 2003; SCHAFFEL, 2002).

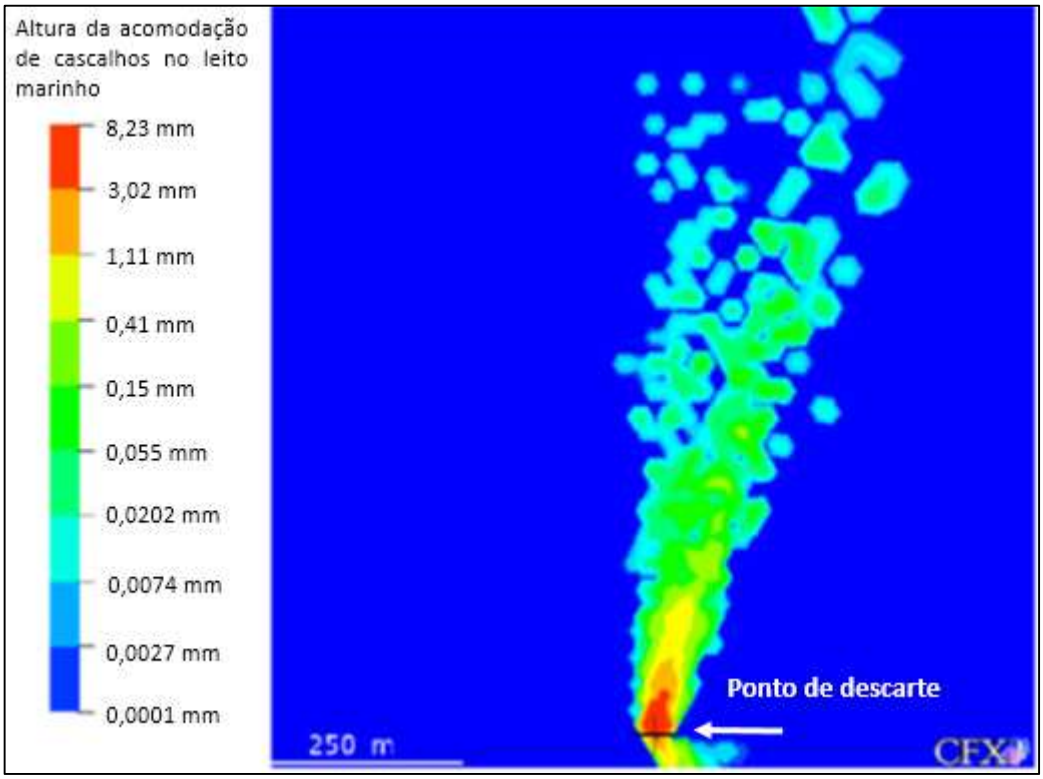
Figura 3 - Ilustração dos padrões genéricos de assentamento do cascalho das fases de perfuração com fluidos de base água (a) e de base não aquosa (b).



Fonte: Adaptação de OGP (2003).

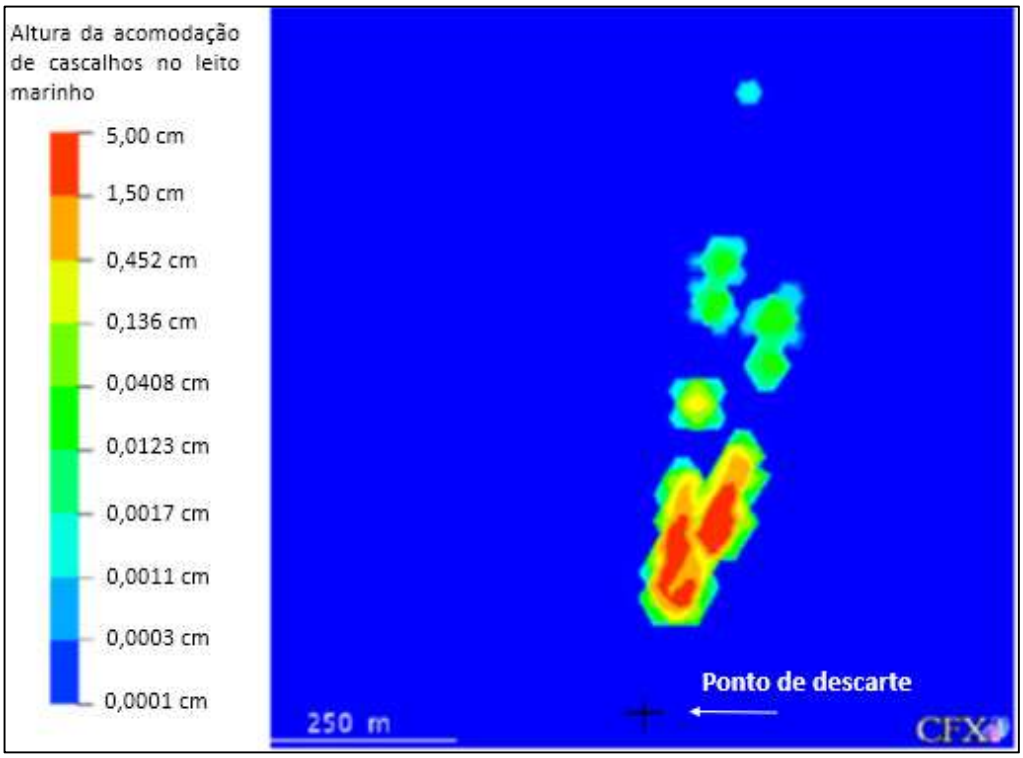
O estudo de Dias (2004), através do emprego de uma ferramenta de fluidodinâmica computacional (CFD), apresenta simulações tridimensionais para o lançamento de cascalhos de perfuração em oceano aberto. O trabalho de modelagem foi realizado com o emprego do pacote de fluidodinâmica computacional denominado CFX®. A Figura 4 ilustra que o máximo valor de espessura acumulada no leito marinho na fase de perfuração com fluido de perfuração de base aquosa foi estimado em 8,2 mm e a Figura 5 mostra que para fase de perfuração com fluido de perfuração de base não aquosa o máximo valor de espessura acumulada é de 5,0 cm.

Figura 4 - Espessura de cascalho aderido a fluido aquoso acumulados no leito marinho.



Fonte: Adaptação de DIAS (2004).

Figura 5 - Espessura de cascalho aderido a fluido não aquoso acumulados no leito marinho.



Fonte: Adaptação de DIAS (2004).

No Brasil, a minuta de Nota Técnica Nº XXX/2014/CGPEG/DILIC/IBAMA apresenta as restrições de descarte dos efluentes da atividade de perfuração marítima de poços de óleo e gás, baseada em toxicidade e presença de contaminantes a partir de avaliação feita pelo gerador no momento da operação. Os Quadros 3 e 4 trazem os critérios que possibilitam o descarte.

Quadro 3 - 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, 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.
FLUIDOS COMPLEMENTARES DE BASE AQUOSA	Não contiver óleo diesel, lignosulfonato de ferrocromo, lignosulfonato de cromo, ligas de ferrocromo ou brometo de zinco ($ZnBr_2$).
	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.

Fonte: Adaptação de Brasil (2014).

Quadro 4 - 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.
CASCALHO ASSOCIADO A FLUIDOS DE PERFURAÇÃO DE BASE NÃO 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 contaminação por óleo da formação, conforme o método *Reverse Phase Extraction* (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 Brasil (2014).

O teste de iridescência estática (S*tatic Sheen Test*) afere se o fluido está contaminado ou não com óleo livre seguindo o protocolo "*EPA 40: Protection of Environmental - Part 435 - Oil and Gas Extraction Point Source Category - Appendix 1 to Subpart A of Part 435 - Static Sheen Test (EPA Method 1617)*" (USEPA, 2011).

Os testes de toxicidade aguda buscam a resposta quanto ao potencial de letalidade do resíduo e são realizados segundo a metodologia NBR 15.308 (ABNT, 2011), através da exposição de amostras ao microcrustáceo *Mysidopsis juniae*, por um período de 96 horas em um sistema estático com efeitos sobre a sobrevivência observados a cada 24 horas. Após este

período é observado o percentual estimado de mortalidade de 50% dos organismos, sendo este denominado CL50 96h (concentração letal a 50% dos organismos) (GAMA, 2014; RAND, 1995; VEIGA, 1998).

O teste RPE (*Reverse Phase Extraction*) é realizado conforme a "*EPA 40: Protection of Environmental - Part 435 - Oil and Gas Extraction Point Source Category - Appendix 6 to Subpart A of Part 435-Reverse Phase Extraction (RPE) Method for Detection of Oil Contamination in Non-Aqueous Drilling Fluids (NAF)* indicando se o cascalho analisado está ou não contaminado com óleo da formação (USEPA, 2011).

Os resíduos de perfuração que não podem ser descartados no mar são encaminhados para destinação em terra, seguido do transporte marítimo e terrestre para o tratamento, se necessário, e disposição final. A destinação final mais comum para estes resíduos é a disposição em aterros industriais. O método de tratamento que cada resíduo será submetido dependerá do seu tipo, composição e padrões da gerenciadora de resíduos. Algumas alternativas de reciclagem, como a fabricação de material asfáltico ou de construção civil a partir do cascalho de perfuração, têm sido desenvolvidas (GAMA, 2014; OGP, 2003; PIRES, 2009; REIS, 1996b).

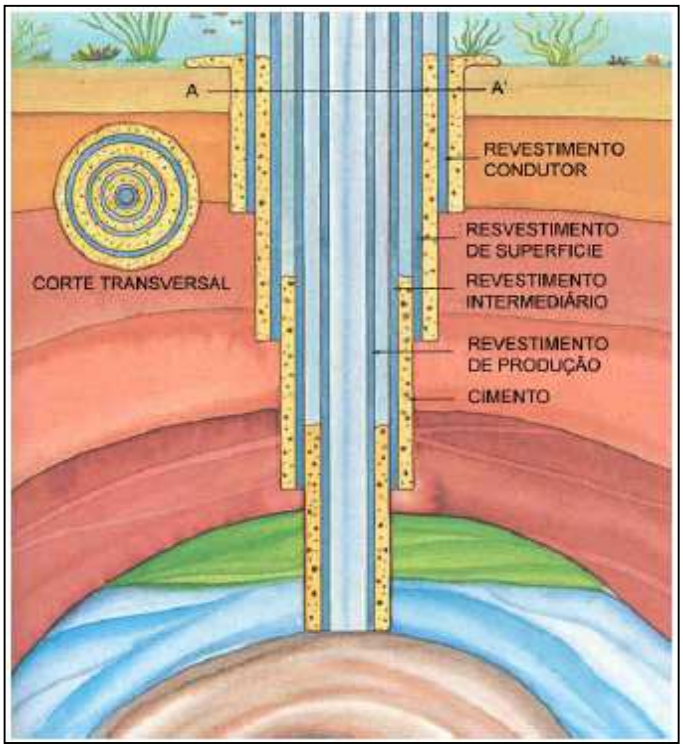
O IBAMA impõe, através de suas licenças ambientais, que toda a atividade de perfuração tenha um monitoramento contínuo de todas as fases da operação. Periodicamente um programa de monitoramento é encaminhado ao órgão ambiental servindo para documentar o cumprimento das determinações estabelecidas pela minuta de Nota Técnica Nº XXX/2014/CGPEG/DILIC/IBAMA (BRASIL, 2014).

Operação de Revestimento e Cimentação

Segundo Schaffel (2002) o poço é perfurado em fases, de acordo com o tipo de formação geológica encontrada. Cada fase que se encerra recebe um revestimento adequado, permitindo que se inicie a perfuração da próxima fase. Como ilustrado na Figura 6 existem basicamente quatro tipos de revestimentos: o condutor, o de superfície, o intermediário e o de produção. Não precisam ser necessariamente utilizados todos os tipos de revestimentos em

um poço. O primeiro revestimento do poço é o condutor, que como está mais próximo da superfície tem a função de prevenir desabamentos de formações próximas à superfície que estejam fracas ou não consolidadas, e proteger lençóis freáticos. O revestimento de superfície também contribui para prevenir desmoronamentos de formações não consolidadas e serve como base de apoio para equipamentos de segurança. Finalmente, o revestimento de produção, que é descido ao poço em caso de existir possibilidade de produção. Ele isola 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.

Figura 6 - Perfil do poço exibindo seus revestimentos.



Fonte: SCHAFFEL (2002).

Assim que cada revestimento é assentado inicia-se a operação de cimentação. Uma pasta de cimento é bombeada ocupando o espaço anular entre o revestimento e as paredes do poço, fixando a tubulação e selando o espaço anular. 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. A vida útil do poço é diretamente dependente da qualidade deste selo hidráulico, fazendo do trabalho de cimentação uma operação vital. Isolamento incompleto pode impedir

tanto o poço de ser concluído quanto posteriormente resultar na perda do poço produtor. A importância da operação de cimentação pode ser ampliada pelo fato de que o cimento tem que sobreviver a vida completa do poço que pode variar entre um a cinquenta ou mais anos.

De modo geral a operação de cimentação é realizada bombeando-se pasta de cimento precedida de um colchão espaçador 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 ou em água do mar. Os aditivos darão 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, segue na frente da pasta com função de limpar o poço e evitar o contato da pasta com o fluido de perfuração de modo a permitir o melhor posicionamento da pasta de cimento.

Os aditivos empregados ao cimento podem ser: aceleradores (para diminuir o tempo de pega da pasta de cimento), retardadores (prolongam o tempo de pega do cimento), extensores (são 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 (aditivos para tampar zonas que possuam a tendência de absorver os fluidos, por serem inconsolidadas ou fracas), agentes anti-espumamante (aplicados para alterar a tensão superficial do cimento) e agentes anti-migração de gás (SCHAFFEL, 2002).

Denomina-se cimentação primária à cimentação de cada coluna de revestimento, levada a efeito logo após a sua descida no poço. Seu objetivo básico é colocar uma pasta de cimento não contaminada em determinada posição no espaço anular entre o poço e a coluna de revestimento, de modo a se obter fixação e vedação eficiente e permanente desde anular. Estas operações são executadas em todas as fases do poço, sendo previstas no programa do mesmo (THOMAS, 2001).

Cimentação de revestimentos intermediários, de produção e *liners* tem o objetivo de isolar as formações com pressões anormalmente baixas ou anormalmente altas, isolar as formações incompetentes e sensíveis ao contato com o fluido de perfuração e proteger as zonas portadoras de hidrocarbonetos para evitar redução da produtividade devido a uma

possível sensibilidade da formação aos fluidos contidos no poço. Os *liners* são utilizados em operações de cimentação em zonas com profundidades altas, no sentido de se eliminar a descida de um revestimento completo. Diferente dos outros revestimentos que são instalados presos ao revestimento de superfície, o *liner* é acoplado diretamente no último revestimento descido. Operações para corrigir deficiências resultantes de alguma operação de cimentação malsucedida também podem ser realizadas. A decisão quanto à necessidade ou não da correção de cimentação primária é uma tarefa de grande importância, pois o prosseguimento das operações, sem o devido isolamento hidráulico entre as formações permeáveis, pode resultar em danos ao poço (THOMAS, 2001).

Dando sequência a construção do poço, operações com fluidos de completação são realizadas na etapa posterior à perfuração e cimentação dos poços. O objetivo principal da etapa de completação é de estabelecer a comunicação física entre a formação produtora e o poço propriamente dito. Para isto, os fluidos de completação atuam substituindo os fluidos de perfuração remanescentes no poço e, por isso, apresentam composições específicas para evitar danos às zonas de interesse. De maneira geral, as operações com os fluidos de completação são simplificadas e consistem no bombeio adequado do fluido preparado para o poço. Ao término da operação, o fluido de completação 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.

Resíduos gerados na Operação de Cimentação

A operação de cimentação pode gerar como volumes residuais: resíduo de água de lavagem, água de mistura, colchão espaçador ou lavador e pasta de cimento. A minuta de Nota Técnica Nº XXX/2014/CGPEG/DILIC/IBAMA proíbe o descarte de todos esses efluentes como ilustra o Quadro 5.

Quadro 5 - Resíduos com descarte proibido pelo IBAMA.

DESCARTE PROIBIDO EM ÁGUAS MARINHAS	
TODOS resíduos da Operação de Cimentação	Água de Lavagem
	Volume morto de Água de Mistura
	Volume morto de Colchão Espaçador ou Lavador
	Pasta de Cimento

Fonte: Adaptação de Brasil (2014).

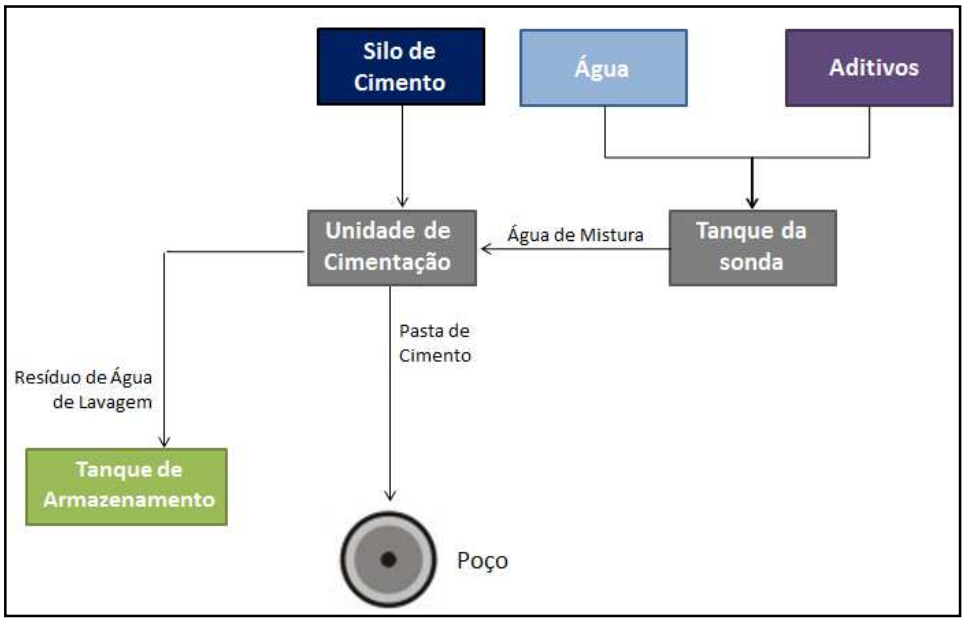
A geração de água de lavagem ocorre durante a frequente operação de lavagem das partes internas do equipamento onde a pasta de cimento foi preparada, unidades de cimentação ou tanque de mistura. O volume de resíduo gerado geralmente contém 1 parte de sólido (pasta de cimento) para 20 partes de água doce utilizada na operação de lavagem.

Existem duas situações em que volumes residuais de água de mistura e colchão espaçador/lavador podem ser gerados: oriundo do volume morto não bombeado do tanque em que a água de mistura ou colchão em questão são preparados ou em situações emergenciais onde todo o volume preparado não pode ser utilizado devido a alguma alteração do programa operacional da operação de cimentação. Nos casos em que não é possível concluir a mistura (por razão incontornável) de um determinado volume de pasta, a pasta retorna aos tanques da sonda na superfície caracterizando assim uma situação emergencial em que resíduo de pasta de cimento é gerado.

Na operação de cimentação o resíduo gerado com maior frequência é o de água de lavagem. Esta geração quando comparada com a geração dos resíduos da operação de perfuração tem frequência maior, entretanto os volumes gerados são consideravelmente menores. Um poço padrão tem a operação de cimentação dividida em 5 fases e cada fase deve ter o revestimento específico cimentado: revestimento condutor (fase I), revestimento de superfície (fase II), revestimento intermediário (fase III), revestimento de produção (fase IV) e *liner* (fase V). Na geração do resíduo de água de lavagem, em torno de 3 m³ de resíduo são gerados por fase cimentada, totalizando um volume de em média 15 m³ por poço.

A pasta de cimento é preparada na unidade de cimentação, equipamento que recebe água de mistura dos tanques da sonda e cimento dos silos da sonda e logo depois é bombeada continuamente para o poço em operações de início de poço. Após o bombeio de toda pasta de cimento realiza-se a lavagem das partes internas da unidade de cimentação. Como resultado é gerado um volume residual de água de lavagem que será armazenado em um tanque de resíduo como indica a Figura 7.

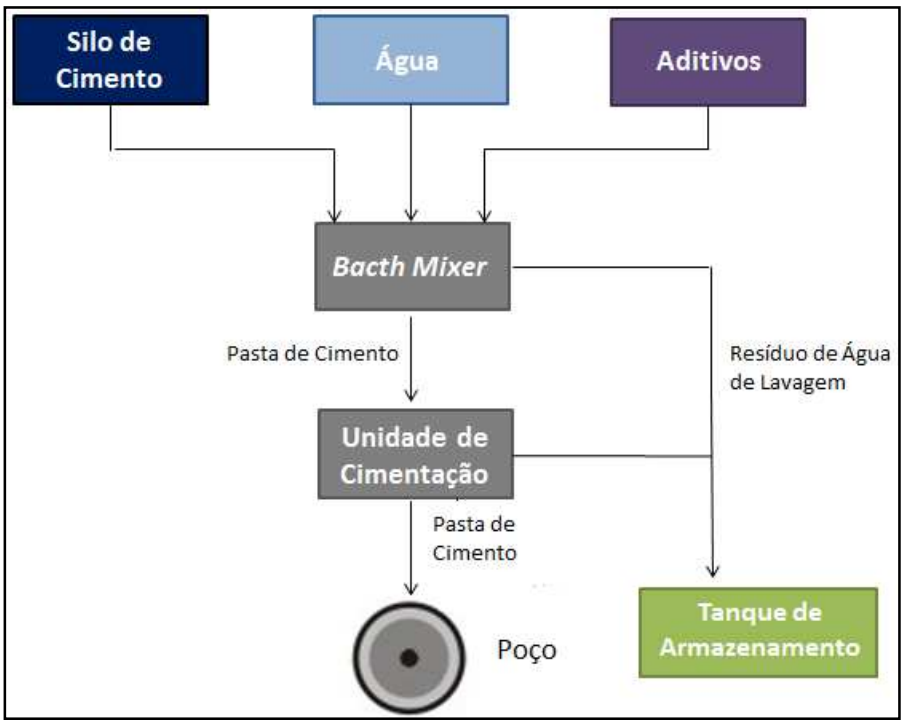
Figura 7 - Preparo de pasta de cimento para operações de início de poço.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2014).

Nas operações de cimentação de revestimento intermediário, de produção e *liner* existe a possibilidade de uso de equipamento denominado tanque de mistura (*batch mixer*) para o preparo de pasta de cimento ou somente da água de mistura. Este recurso está disponível como equipamento fixo nas unidades ou como equipamento portátil. Quando a pasta de cimento é preparada no *batch mixer* a unidade de cimentação apenas bombeia a pasta já pronta para o poço, por meio de suas bombas. São gerados volumes residuais de água de lavagem do próprio *batch mixer* e da unidade de cimentação, esses resíduos são armazenados em um tanque de resíduo como mostra a Figura 8.

Figura 8 - Preparo de pasta de cimento no *batch mixer* para as operações de cimentação de revestimento intermediário, de produção e *liner*.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2014).

Quando o *batch mixer* é utilizado somente para o preparo da água de mistura, esta é enviada para a unidade de cimentação, que recebe o cimento dos silos das sondas. A unidade de cimentação, à medida que recebe estes insumos, mistura-os na proporção correta e, continuamente, bombeia a pasta preparada diretamente para o poço. É gerado volume residual de água de lavagem da unidade de cimentação que é armazenado em um tanque de resíduo. Se o *batch mixer* não estiver disponível, a água de mistura e a pasta de cimento são preparados convencionalmente na unidade de cimentação.

Os tanques de resíduos, também chamados de *cementing boxes*, são o principal método de transporte dos resíduos de cimentação, um exemplo deles é apresentado na Figura 9. Segundo Piper *et al.* (2005), os *cementing boxes* foram desenvolvidos para facilitar o recolhimento e transporte dos resíduos, atendendo as restrições de peso dos guindastes *offshore* em sondas de perfuração. Os *cementing boxes* são colocados perto dos tanques que geram os resíduos, para facilitar a transferência de um tanque para o outro através de bombeio. Quando o conjunto de *cementing box* disponível na sonda fica cheio, o desembarque é providenciado e um novo conjunto chega para substituí-lo.

Figura 9 - Tanque para armazenamento e transporte de resíduos de cimentação.

Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2014).

O transporte marítimo dos *cementing boxes* cheios é realizado por barcos de apoio que fornecem suporte à atividade e em terra estes resíduos seguem por transporte rodoviário até o local onde será realizada a destinação final adequada. Chegando a gerenciadora de resíduos co-responsável pela destinação final adequada, a fase líquida segue para tratamento biológico ou físico químico em uma ETE (Estação de Tratamento de Efluentes) e a parte sólida/semissólida é encaminhada para aterro industrial.

Periodicamente um programa de monitoramento é enviado ao órgão ambiental documentando a quantidade de resíduo de cimentação encaminhado para destinação final em terra, evidenciando o cumprimento das determinações estabelecidas pela minuta de Nota Técnica Nº XXX/2014/CGPEG/DILIC/IBAMA (BRASIL, 2014).

Conclusão

Analisando o apresentado neste trabalho, vemos que as soluções adotadas para as atividades de perfuração e cimentação de poços de óleo e gás são bem definidas e controladas pelo órgão ambiental através de monitoramento constante junto ao gerador, tanto durante a opção de descarte em mar aberto quanto no recolhimento para destinação em terra.

A ênfase nos processos de controle e monitoramento resulta em uma eficiente forma de se acompanhar o resultado real das atividades. Segundo Brasil (2014) prevê-se ainda uma evolução gradual no nível de controle do programa e incentiva-se que o gerador evidencie a busca por procedimentos que minimizem a poluição gerada pelos resíduos sólidos e efluentes líquidos passiveis ou não de descarte em águas marinhas.

Recomenda-se que sejam realizados estudos de caracterização ambiental dos resíduos de cimentação e simulações computacionais de possíveis descartes do resíduo gerado em maior frequência, o de água de lavagem, assim como o citado para os resíduos de cascalhos de perfuração, onde Dias (2005) conseguiu prever o comportamento dos sólidos na coluna d’água e sua acomodação no leito marinho.

Acrescenta-se ainda que qualquer tentativa de se conhecer o resultado advindo da geração de resíduos a bordo, de sua disposição em terra e do descarte de rejeitos no mar é de fundamental importância para buscar a minimização de impactos e assim descobrir a melhor forma de proteger a saúde do meio ambiente, fator essencial para que os geradores preservem suas responsabilidades legal e financeira (ARARUNA JR. & BURLINI, 2013).

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.

ARARUNA JR., J.; BURLINI, P.; **Gerenciamento de resíduos na indústria de petróleo e gás.** 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. p. 01-76.

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.; SANNI, 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.

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.

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.

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

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 3° 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.

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 Aglia. 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.

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

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.

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: Elsivier, 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.

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.

USEPA, United States Environmental Protection Agency. **Analytic Methods for the Oil and Gas Extraction Point Source Category**, 2011.

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 resíduo da limpeza de unidade de cimentação gerado na operação de cimentação de poços de óleo e gás

Computer simulation of the offshore disposal of the waste generated from cleaning the cementing unit in the cementing operation of oil and gas wells

CAMPOS, L. F.[1] e LUGON JR, J.[2].

[1] Mestranda em Engenharia Ambiental. Instituto Federal Fluminense/*Campus* Macaé.
[2] D.Sc. em Modelagem Computacional. Instituto Federal Fluminense/*Campus* Macaé.

Resumo

Neste trabalho é apresentada a modelagem computacional aplicada a simulação do descarte em mar aberto do volume residual da limpeza da unidade de cimentação, onde é preparada a pasta de cimento utilizada durante as operações de cimentação de poços de óleo e gás. O software utilizado foi o MOHID WATER que permitiu o uso de uma abordagem lagrangeana, onde a parte sólida do resíduo foi representada por partículas e a fase contínua pelo próprio ambiente receptor. Espera-se prever o comportamento da parte sólida do resíduo na coluna d'água e sua acomodação no leito marinho.

Palavras-chave:

Modelagem computacional. MOHID WATER. Descarte de resíduos. Ambiente Marinho. Modelo Lagrangeano.

Abstract

This paper presents computer modeling applied to disposal simulation of the offshore residual volume of the cementing unit, where the cement paste utilized during the cementing operations of oil and gas wells is prepared. The software used was the MOHID WATER allowing a lagrangian approach where the solid part of the residue was represented by particles and the continuous phase by its own receiving environment. It is expected to predict the behavior of the solid part of the residue in the water column and its accommodation on the seabed.

Keywords:

Computer modeling. MOHID WATER. Waste disposal. Marine Environment. Lagrangian Model.

Introdução

A atividade petrolífera é desenvolvida em condições cada vez mais restritivas do ponto de vista ambiental, sendo incessantes os estudos e investimentos em busca da sustentabilidade (DIAS, 2005). O impacto ambiental da atividade é inevitável, as operações de perfuração e cimentação de poços estão associadas, conforme Brasil (2014), à descarga de rejeitos e à geração de volumes residuais. O Quadro 1 apresenta os resíduos gerados em cada operação realizada durante a construção de poços de óleo e gás.

Quadro 1 - Resíduos das operações de perfuração e cimentação.

Operação	**Resíduo**
Perfuração	Fluidos de Perfuração
	Fluidos Complementares
	Cascalhos
Cimentação	Água de lavagem
	Água de mistura
	Fluido Complementar
	Pasta de Cimento

Fonte: Adaptação de Brasil (2014).

Dentre os resíduos citados acima, o resíduo de maior geração durante as operações de perfuração são os cascalhos associados a fluidos de perfuração de base aquosa ou não aquosa, enquanto que nas operações de cimentação a água de lavagem resultante da limpeza de unidades de cimentação onde a pasta de cimento foi preparada é gerada em maior volume e frequência. O Quadro 2 traz as quantidades de cascalhos e água de lavagem geradas durante a construção de um poço tipo de 5 fases.

Quadro 2 - Volume gerado de cascalhos e água de lavagem durante a construção de um poço.

Resíduo	**Volume gerado***
Cascalho de perfuração	239 m³
Água de lavagem	18 m³
* Geração média durante a construção de um poço de 5 fases com profundidade em torno de 3000 m.	

Fonte: Próprio autor (2015).

O resíduo de água de lavagem, assim como todos os demais resíduos gerados durante as operações de cimentação, tem seu descarte em mar aberto proibido pelo órgão ambiental que regula a atividade, o IBAMA. Todos os resíduos das operações de cimentação são armazenados temporariamente nas sondas de perfuração em tanques, chamados *cementing boxes*, que após transporte marítimo e terrestre chegam ao local de destinação final adequada. Tratando especificamente do resíduo de água de lavagem, que é composto basicamente por 01 parte de cimento para 20 partes de água doce, a parte sólida é encaminhada para aterro sanitário enquanto a parte líquida segue para uma estação de tratamento de efluentes industriais.

Com o aumento da capacidade de cálculo dos computadores, associada à sua vulgarização, desenvolveram-se modelos matemáticos cada vez mais sofisticados, utilizando grande variedade de metodologias na discretização de equações que caracterizam diversos processos. Permitindo assim, por exemplo, o cálculo mais adequado e completo das equações matemáticas que representam os fenômenos físicos relacionados ao transporte de resíduos lançados no ambiente marinho, sendo importante fator na busca de soluções mais precisas para este problema ambiental (DIAS, 2005; LEITÃO, 1996).

No meio marinho desenvolvem-se processos físicos, biológicos, químicos e geológicos. A escolha de uma metodologia depende dos processos que o modelo proposto destina-se a simular. A motivação deste trabalho é investigar através de modelagem computacional como o resíduo de água de lavagem se comportaria no ambiente marinho caso seu descarte fosse permitido pelo órgão ambiental. Serão estudados somente os processos físicos, abordando a hidrodinâmica da região escolhida e simulando o comportamento da parte sólida do resíduo na coluna d’água utilizando como ferramenta de modelagem computacional o software MOHID WATER.

O MOHID WATER é um sistema de modelagem de água desenvolvido no Centro de Ciência e Tecnologia do Ambiente e do Mar (MARETEC) no Instituto Superior Técnico (IST), que pertence à Universidade Técnica de Lisboa (UTL) em Portugal (KENOV *et al.*, 2012). Consiste em um software de modelação de água que pode ser usado para simular a dinâmica das massas de água, fluxo de meios porosos e infiltração, e bacias hidrográficas integradas. O desenvolvimento iniciou-se em 1985 e ao longo dos últimos anos MOHID WATER tem sido usado para simular uma variedade de processos físicos, químicos e ecológicos em diferentes escalas em sistemas marinhos, sendo desde então submetido a um contínuo melhoramento e atualização, devido à sua aplicação em muitas pesquisas e projetos de engenharia (JULIANO *et al.*, 2012; MARETEC, 2015).

Como exemplos da aplicação do MOHID WATER em modelagem em mar aberto, alguns estudos foram feitos na região do Atlântico Nordeste, incluindo a corrente costeira de Portugal (COELHO *et al.*, 1994), o comportamento de correntes ao longo do limite da Plataforma Continental no Atlântico Europeu (NEVES *et al.*, 1998) e a geração interna de ondas de maré (NEVES *et al.*, 1998).

No Brasil, a ferramenta numérica MOHID WATER auxiliou Sampaio (2008) no gerenciamento costeiro do estuário de Santos, Precioso *et al.* (2010) no estudo de parâmetros de qualidade de água na Lagoa do Vigário (RJ), Souza (2011) no estudo da intrusão salina no Rio São João, Lima (2012) na identificação dos parâmetros hidrodinâmicos no estuário do Rio Macaé, Pessanha (2012) na aplicação da modelagem de gestão sanitário-ambiental da lagoa Imboassica-RJ e Costa (2013) na avaliação ambiental da implantação de PCH (Pequena Central Hidrelétrica) no rio Itabapoana.

O MOHID WATER está programado em ANSI FORTRAN 95 e o seu sistema é formado por mais de 40 módulos, os quais somam mais de 150.000 linhas de programação, com capacidade para simular a hidrodinâmica, os fenômenos de dispersão (abordagens lagrangiana e euleriana), a qualidade da água e o transporte de sedimentos (coesivos e não coesivos), além de um módulo de sistema de informações geográficas (SIG), que possibilita a criação da malha computacional na qual são aplicadas as simulações. Cada módulo é responsável por gerenciar um tipo de informação, podendo ser entendido como um modelo

específico (JULIANO *et al.*, 2012; MIRANDA *et al.*, 2000; PESSANHA, 2012). Os principais módulos são listados no Quadro 3.

Quadro 3 - Principais módulos do MOHID WATER.

Módulo	**Descrição**
Model	Gerencia o fluxo de informações entre o módulo hidrodinâmico e os dois módulos de transporte, bem como a comunicação entre os submodelos.
Hydrodynamic	Modelo tridimensional baroclínico com superfície livre. Calcula o nível, as velocidades e os fluxos de água.
Water Properties	Modelo de transporte com abordagem euleriana, sendo capaz de simular a evolução de propriedades de água, como temperatura, salinidade, oxigênio, etc.
Lagrangian	Capaz de simular a evolução das mesmas propriedades, utilizando a abordagem lagrangiana.
Water Quality	Modelo adimensional de qualidade de água. Simula o ciclo de oxigênio, de espécies de nitrogênio e do fósforo. Está acoplado aos modelos de transporte, tanto na abordagem euleriana quanto na lagrangiana.
Oil Dispersion	Módulo de dispersão de petróleo. Simula o espalhamento de petróleo devido a gradientes de concentração e reações internas, como evaporação, emulsificação, dispersão, dissolução e sedimentação.
Turbulence	Módulo unidimensional de turbulência.
Geometry	Armazena e atualiza as informações de volumes finitos.
Surface	Condição de contorno no topo da coluna d'água
Bottom	Condição de contorno no limite inferior da coluna d'água.
Open Boudary	Condição de contorno na fronteira marinha.
Discharges	Descargas em rios ou descargas antropogênicas.
Hydrodynamic File	Módulo auxiliar utilizado para armazenar a solução do modelo hidrodinâmico em um arquivo externo, para posterior utilização.

Fonte: Adaptação de MARETEC (2012).

O módulo hidrodinâmico é capaz de simular o fluxo de massas de água sendo uma ferramenta numérica destinada a ajudar a compreensão dos processos biogeoquímicos e resolver problemas ecológicos associados à atividade humana (IST, 2015b). É um modelo tridimensional que resolve as Equações de Navier-Stokes, considerando as aproximações de Boussinesq, onde se supõe que todas as propriedades do fluido são constantes, com exceção da densidade no termo de força peso, que varia linearmente com a temperatura. As equações

são resolvidas numericamente pelo método de volumes finitos, com uma genérica discretização vertical que permite a execução simultânea de vários tipos de coordenadas verticais (FRANZ *et al.*, *in press*; LEITÃO, 1996).

De acordo com Neves (1985), inicialmente o módulo de transporte lagrangeano do MOHID WATER foi desenvolvido para ser acoplado a um modelo hidrodinâmico bidimensional, resolvendo as equações primitivas para pequenas profundidades usando aproximação hidrostática, assim, apenas simulava a trajetória de boias à deriva. Em uma segunda fase foi alterado de modo a simular mecanismos mais complexos (efluentes de águas residuais, emissões pontuais de sedimentos, emissões de grandes massas de poluentes flutuantes passivos) e estudos de qualidade da água (determinação de tempos de residência de massas de água em áreas específicas do domínio). Em uma terceira fase, o sistema de coordenadas foi generalizado de modo que fosse possível acoplar o modelo de partículas a modelos hidrodinâmicos 2D e 3D. Sinteticamente, o esquema de cálculo, pode ser dividido em três grandes passos: geração, transporte e eliminação das partículas (IST, 2015a).

Metodologia

O lançamento do resíduo em ambiente marinho é um problema de escoamento multifásico, em que a fase contínua é constituída pela água do mar (ambiente receptor) e a fase dispersa por resquícios de pasta de cimento. A modelagem em questão foi implementada no MOHID WATER através dos módulos hidrodinâmico e lagrangeano. 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.

De acordo com Leitão (1996), a abordagem lagrangeana consiste em associar massa às partículas emitidas em pontos específicos do domínio. A trajetória de cada partícula é calculada, com base em um campo de velocidades, fornecido pelo modelo hidrodinâmico acoplado, sendo o campo de concentrações função da densidade da partícula em cada célula da malha. O termo advectivo é resolvido indiretamente através da trajetória produzida pelo

campo de velocidades não turbulento. A localização em cada instante de tempo é dada pela equação 1:

$$\frac{dx_i}{dt} = U_i(x_i, t) \quad (1)$$

onde:

$x_i = x(x, y, z, t)$ - localização da partícula no instante t;

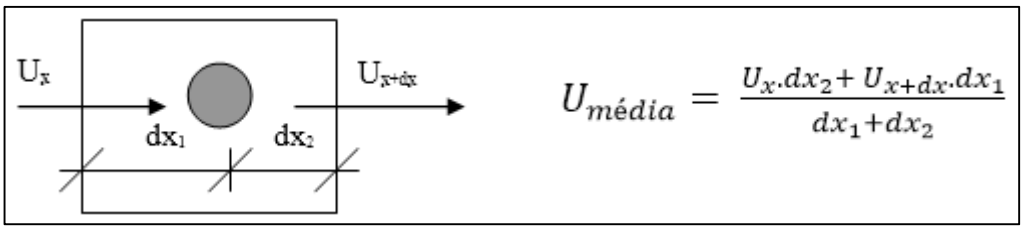
$U_i(x_i, t)$ - velocidade da partícula.

A equação 1 é resolvida aplicando um método explícito simples demonstrado pela Equação 2, que aplica precisão suficiente para se obter bons resultados para maioria dos escoamentos naturais (IST, 2015a).

$$x_i^{t+\Delta t} = x_i^t + \Delta t . U_i' \quad (2)$$

A Figura 1 ilustra que as velocidades U_x e U_{x+dx} são calculadas recorrendo a uma simples interpolação, tendo por base o campo de velocidades calculado pelo modelo hidrodinâmico aclopado.

Figura 1 - Cálculo da velocidade média das partículas.



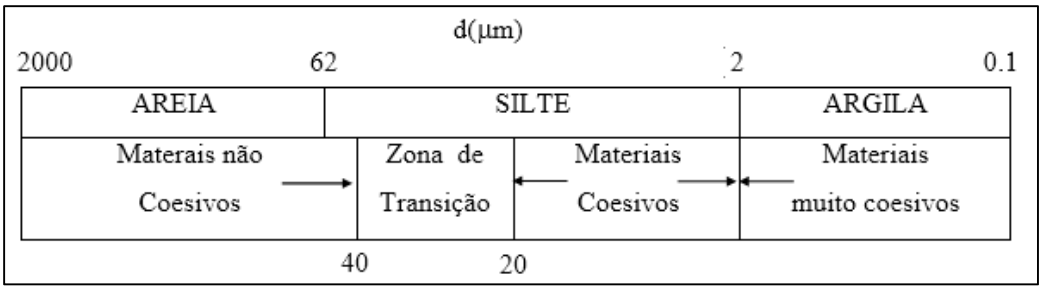
Fonte: Adaptação de Leitão (1996).

Segundo Costa (2002) as partículas apresentam seis características principais: coordenadas espaciais (x,y,z), velocidade aleatória horizontal/vertical, tempo durante o qual a partícula mantém a velocidade aleatória, velocidade de sedimentação, massa e volume. Para cada umas destas propriedades uma equação de evolução tem que ser resolvida. Geralmente a velocidade média é a principal responsável pelo movimento das partículas.

A emissão das partículas pode ser feita de várias maneiras, tanto a nível espacial como a nível temporal. A emissão espacial pode ser feita por uma ou várias origens em que cada origem pode corresponder a uma emissão pontual ou uma área definida por um polígono, tendo as partículas a mesma lista de propriedades e fazendo uso dos mesmos parâmetros na caracterização de seu percurso randômico. A emissão temporal pode ser do tipo instantânea que emite partículas em um dado instante de tempo ou do tipo contínua que emite partículas durante um período de tempo (IST, 2015a; JULIANO *et al.*, 2012).

Segundo Leitão (1996), quando se estuda sedimentos, é necessário considerar que estes possuem uma grande gama de dimensões, dividindo-se em areia, silte e argila. Outro critério de divisão é em termos de atividade, isto é, da propensão que uma partícula tem para estabelecer ligações com outras partículas circundantes podendo as forças atrativas entre estas partículas serem superiores às forças gravitacionais. Neste critério, como detalhado na Figura 2, dividem-se os sedimentos em dois grandes grupos: materiais ativos ou coesivos e materiais inertes ou não-coesivos.

Figura 2 - Comparação entre o critério da granulometria e o critério da atividade.



Fonte: Adaptação de Leitão (1996).

De modo a ser possível simular o processo de sedimentação, associou-se a cada partícula uma velocidade de sedimentação calculada a partir de um diâmetro da partícula, *d*, recorrendo à equação 3, que calcula a velocidade de sedimentação, w_s, de partículas não-esféricas (LEITÃO, 1996; RIJN, 1989).

$$w_s = \frac{10\upsilon}{d}\left[\left(1+\frac{0.01(d_s-1)gd^3}{\nu^2}\right)^{0.5}-1\right] \quad 100 < d < 1000\ \mu\text{m} \qquad (3)$$

onde:

d - diâmetro da partícula dos sedimentos;

d_s - densidade dos sedimentos;

ν - viscosidade cinemática da fase contínua;

g = 9,80 m/s²;

Resultados e Discussão

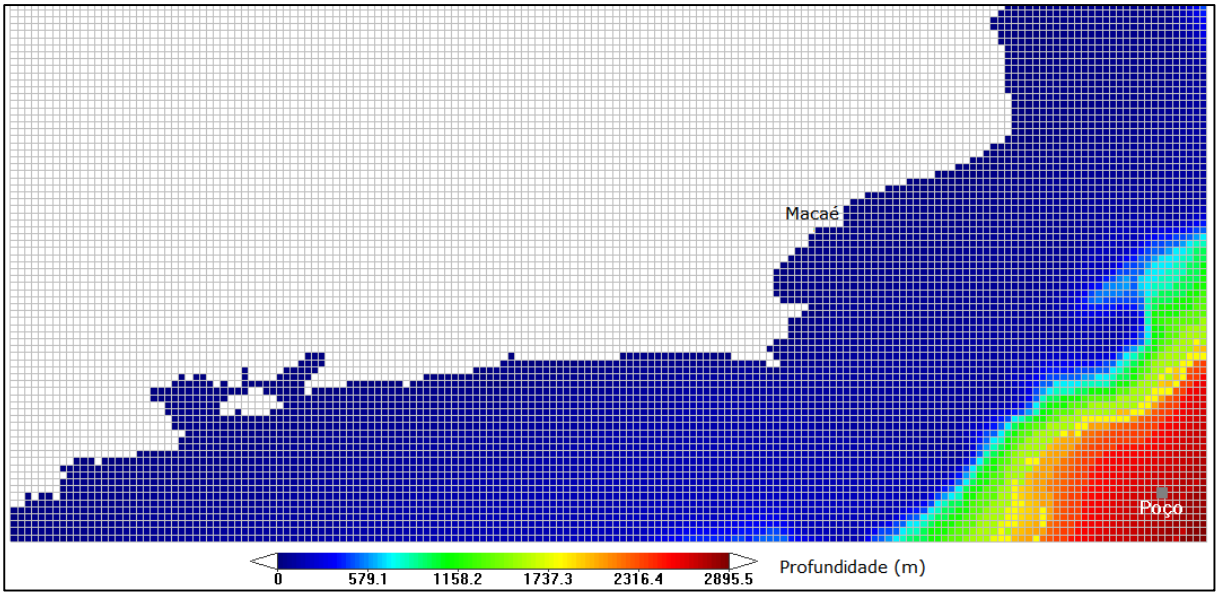
Foi realizada a simulação do descarte do resíduo de água de lavagem gerado em um poço fictício localizado na Bacia de Campos, nas coordenadas UTM 116026 N e 505437 E, *datum* SIRGAS, meridiano central 33º.

As simulações representam os 3 primeiros dias do mês de março do ano de 2013. Na presente modelagem, foi descartado o volume de 3,6 m³ do resíduo água de lavagem, quantidade média gerada durante uma operação de cimentação de um poço, através de uma tubulação de 10 polegadas de diâmetro, situada a 20 m abaixo da superfície marinha, com vazão de 31,8 m³/h.

As hipóteses e restrições assumidas neste trabalho para se determinar a trajetória das partículas de pasta de cimento no descarte do resíduo em questão são: (a) as partículas de cimento se aglomeram resultando em um diâmetro médio de 220 μm, com densidade de 1,589 g/cm³, resultando em uma velocidade de sedimentação de 1,23 x 10^{-2} m/s (resultado obtido pela equação 3); (b) as partículas são consideradas inertes; (c) as partículas são consideradas não coesivas; (d) a emissão de partículas é pontual e temporal e (e) a difusão molecular é desprezível em comparação com a difusão turbulenta. Cabe ressaltar que toda abordagem lagrangeana deste trabalho partiu da solução do módulo hidrodinâmico desenvolvida por Franz *et al.* (*in press*).

A área abrangida pelo domínio estudado é apresentada na Figura 3, onde a discretização vertical apresenta 42 camadas cartesianas sobrepostas por 7 camadas sigma. O terreno digital foi discretizado em um domínio com malha de 3 km x 3 km.

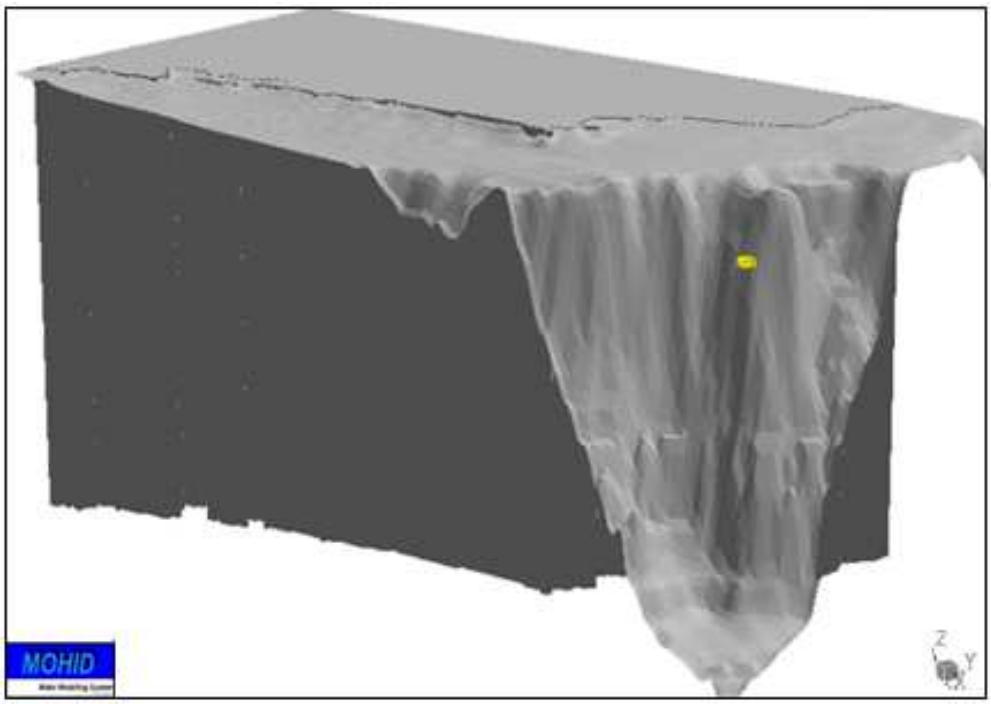
Figura 3 - Terreno digital da batimetria região estudada, via interface GIS do MOHID.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2015).

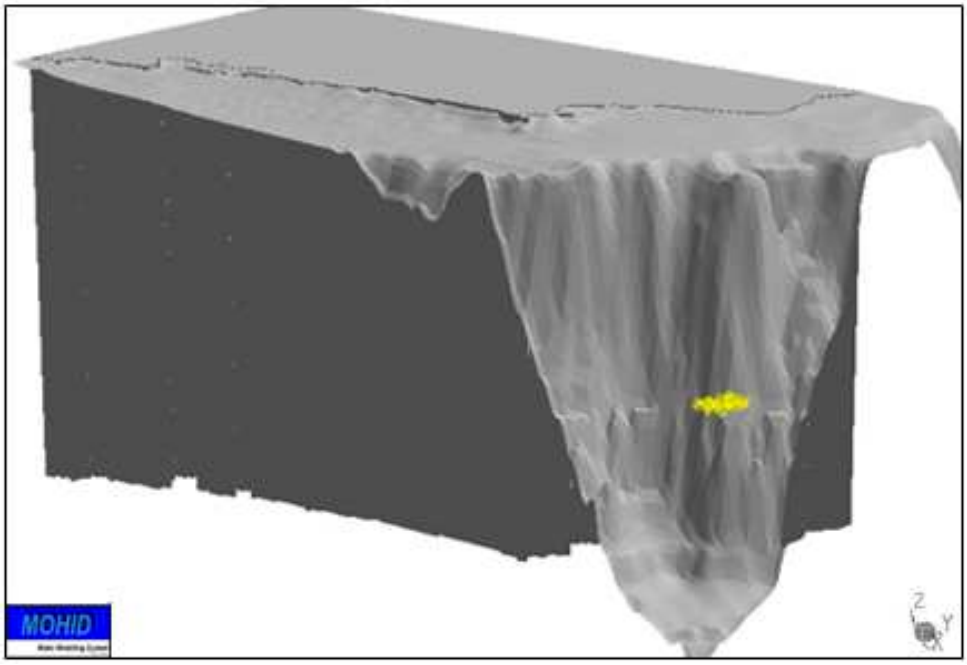
A seguir são apresentados os resultados da aplicação do software MOHID, ferramenta MOHID WATER onde é possível visualizar as trajetórias das partículas em diversos instantes durante os três dias de estudo. As Figuras 4 a 6 permitem a visualização da evolução dos resultados em instantes gerados em intervalos distintos, observa-se que em qualquer instante a área ocupada pela pluma é muito inferior à área do domínio em estudo. Já a Figura 7 detalha a acumulação no leito oceânico, sendo possível notar o efeito da dispersão turbulenta atuando sobre as partículas.

Figura 4 - Trajetória das partículas após oito horas do início do descarte.



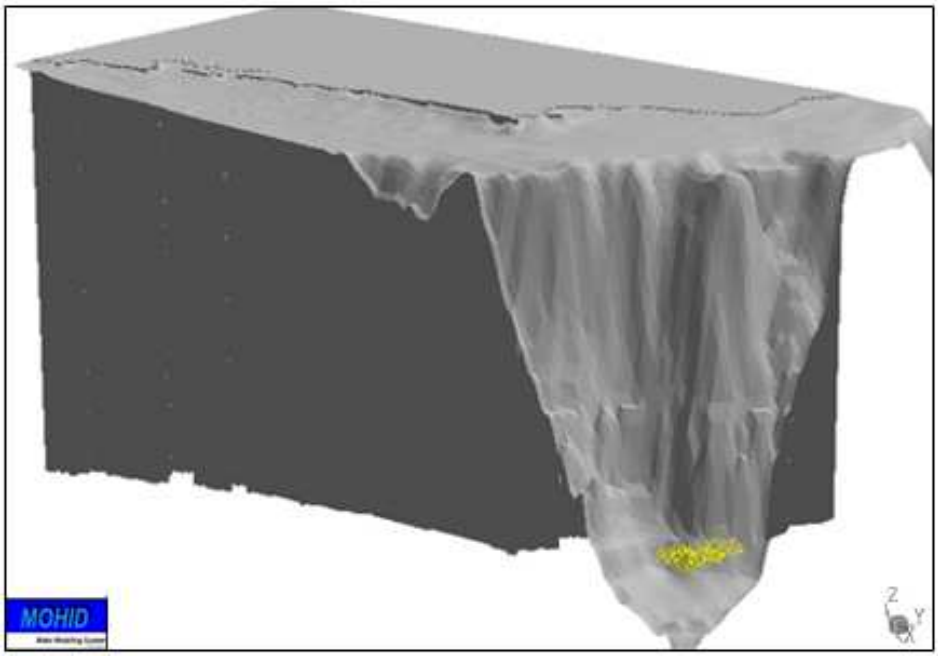
Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2015).

Figura 5 - Trajetória das partículas após vinte e oito horas do início do descarte.



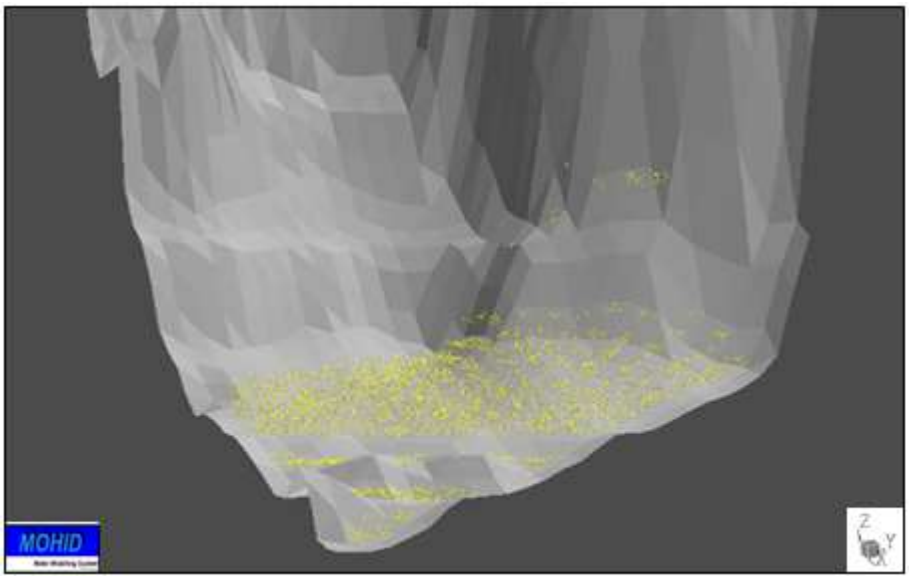
Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2015).

Figura 6 - Trajetória das partículas após dois dias do início do descarte.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2015).

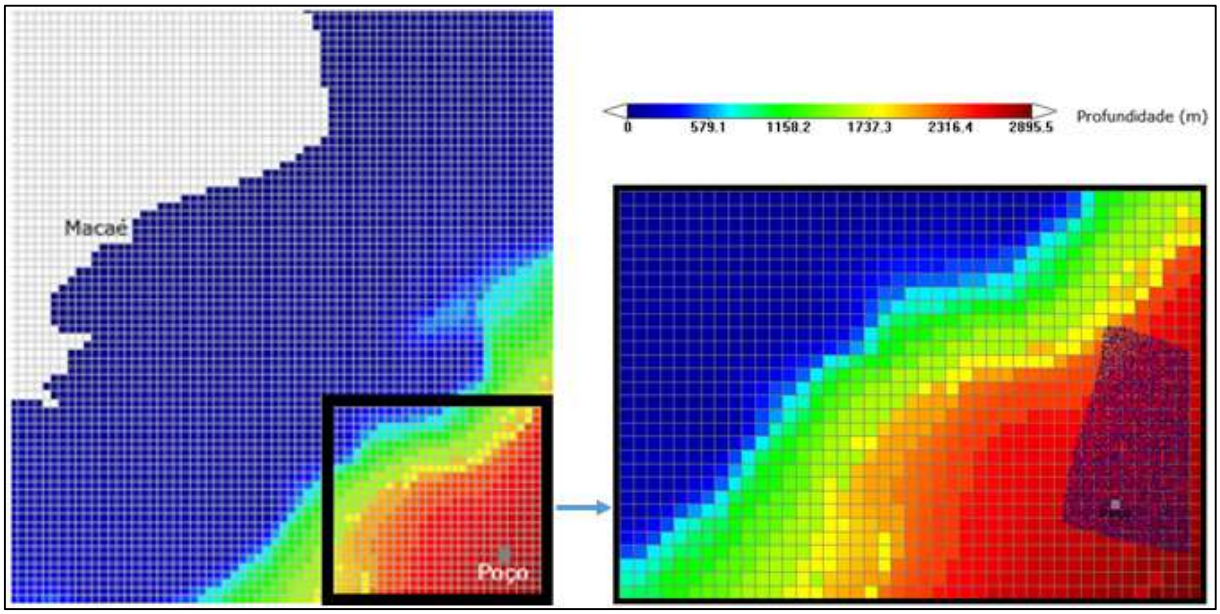
Figura 7 - Acomodação das partículas no leito oceânico do domínio estudado.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2015).

A Figura 8 representa a vista superior da área ocupada pelas partículas ao fim da simulação proposta.

Figura 8 - Vista superior da acumulação das partículas no leito marinho.



Fonte: PRÓPRIO AUTOR (2015).

Analisando o apresentado pela Figura 8, sabendo que a malha utilizada é de 3 km x 3 km, verifica-se que a área final ocupada pelas partículas é de aproximadamente 1017 km². Sabendo que a parte sólida do resíduo de água de lavagem tem densidade de 1,04 kg/L e que a simulação despejou 3600 L, 3744 kg de resíduo foram descartados contendo 187 kg de parte sólida, resultando que 1 m² de área ocupada tem dispersa, em média, a desprezível quantidade de 0,18 mg.

O valor de área total ocupada pelas partículas que representam 187 kg de parte sólida do resíduo, somada à informação de que a densidade do resíduo é de 1,589 kg/L resulta em que o máximo valor de espessura de resquícios de cimento acumulados no leito marinho é de $1,15 \times 10^{-10}$ m.

Conclusão

A aplicação do módulo lagrangeano do software MOHID WATER, acoplado as soluções hidrodinâmicas desenvolvidas por Franz *et al.* (*in press*), permitiu a visualização da reprodução do cenário de descarte do resíduo de água de lavagem das operações de cimentação de poços de óleo e gás. As partículas injetadas representando a massa da fase

sólida do resíduo se acumularam com espessura ínfima em uma grande área do leito marinho ao final da simulação.

Acrescenta-se que o estudo aqui apresentado permite avaliar qualitativamente e quantitativamente o impacto ambiental do descarte do resíduo de água de lavagem. O mesmo pode ser ampliado e otimizado partindo do refinamento das hipóteses e restrições assumidas durante o desenvolvimento do modelo utilizado. Recomenda-se um refinamento no tamanho da malha, já que a quantidade de partículas utilizadas foi infinitamente pequena quando comparadas a dimensão das células de 3 x 3 km.

É possível concluir que os resultados deste trabalho evidenciam que o uso da modelagem computacional é uma promissora ferramenta que pode ser aplicada no gerenciamento da problemática ambiental na região modelada, permitindo assim um melhor conhecimento das consequências do lançamento de rejeitos das atividades da indústria petrolífera em mar aberto.

Referências Bibliográficas

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.

COELHO, H.; SANTOS, A.; ROSA, T. L.; NEVES, R. **Modelling the wind driven flow off Iberian Peninsula**. GAIA, v.8, p.71-78, 1994.

COSTA, J. Z. G.; **Influência de uma piscicultura de gaiolas na qualidade da água da zona envolvente.** 129f. Dissertação (Mestrado de Aquicultura) - Faculdade de Ciências do Mar e Ambiente, Universidade do Algarve. Faro (Portugal), 2002.

COSTA, V. T. R.; **Uso de Modelo Matemático para Avaliação Ambiental sobre Implantação de PCH no rio Itabapoana**. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense. Macaé/RJ, 2013.

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.

FRANZ, G.; LEITÃO, P.; SANTOS, A. dos; JULIANO, M.; NEVES. R.; **From regional to local scale modelling on the south-eastern Brazilian shelf: Case study of Paranaguá estuarine system.** System for Estuarine, Coastal and Shelf Science Manuscript Draft. Elsevier Editorial, *in press*.

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, 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.

KENOV, I. A.; GARCIA, A. C.; NEVES, R.; Residence time of water in the Mondego estuary (Portugal). **Estuarine, Coastal and Shelf Science** v.106, p. 13-22. 2012.

LEITÃO, P. M. C. F. L.; **Modelo de Dispersão Langrangeano Tridimensional**. Dissertação (Mestrado em Ecologia, Gestão e Modelação dos Recursos Marinhos) – Universidade Técnica de Lisboa (Instituto Superior Técnico). Lisboa (Portugal), 1996.

LIMA, E. B.; **Problemas Inversos Aplicados à Identificação de Parâmetros Hidrodinâmicos de um Modelo de Estuário do Rio Macaé**. Tese (Doutorado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro UERJ, Nova Friburgo/RJ, 2012.

MARETEC (Centro de Ciência e Tecnologia do Ambiente e do Mar). **Descrição do MOHID**. Campos dos Goytacazes: Ed. Essentia, 132 p., 2012.

MARETEC, 2015. MOHID: Water Modelling System. Disponivel em: <http://maretec. mohid.com>. Acesso: 10 jun. 2015.

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.

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.

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, C. H. O.; KALAS, F.; RODRIGUES, P. P. G. W.; LUGON JR., J. 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, p.186 – 204, 2010.

RIJN, L. C.; **Handbook Sediment Transport by Currents and Waves.** Delft Hydraulics, Report H 461, June 1989.

SAMPAIO, A.; **Avaliação da correlação entre parâmetros de qualidade da água e socioeconômicos no complexo estuarino de Santos – São Vicente, através de modelagem numérica ambiental.** Dissertação (Mestrado) – UNISANTA. Universidade de Santa Cecília, 2008.

SOUZA, G. L.; **Modelagem Computacional Aplicada ao Estudo da Intrusão Salina no Rio São João**. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense. Macaé/RJ, 2011.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

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 3° Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás**. Salvador, 2004.

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.

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.

SILVA, L. B.; NASCIMENTO, J. H. O.; MARTINELLI, A. E.; MELO, D. M. A.; LIMA, F. M.; Caracterizações físico-química e mecânica de compósitos de cimento Portland G/poliuretanas para a cimentação de poços de petróleo. **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**. Foz do Iguaçu, 2006.

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.

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.; **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 f.

VELTMAN, K.; HUIJBREGTS, M. A. J.; RYE, H.; HERTWICH, E. G.; Including impacts of particulate emissions on marine ecosystems in life cycle assessment: The case of offshore oil and gas production. **Integrated Environmental Assessment and Management,** Pensacola, 2011. v. 7, n. 4, p. 678-686.