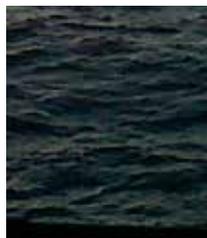
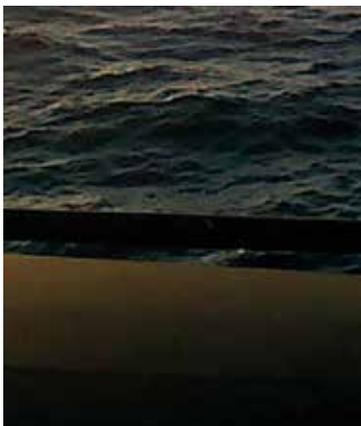
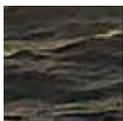
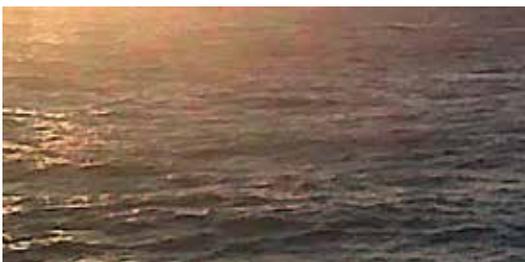


AVALIAÇÃO DE OPÇÕES PARA A DESTINAÇÃO DO CASCALHO GERADO NA PERFURAÇÃO DE POÇOS MARÍTIMOS NO BRASIL



NOVEMBRO 2021

Copyright © 2021 Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP)

Todos os direitos reservados ao Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP).

A reprodução não autorizada desta publicação, por qualquer meio, seja total ou parcial, constitui violação da Lei nº 9610/98 (Lei de Direitos Autorais).

Dados internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Elaborada pela biblioteca do Centro de Informação e Documentação Hélio Beltrão – IBP

I59 Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás
Avaliação de opções para a destinação do cascalho gerado na perfuração de poços marítimos no Brasil / Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Associação Brasileira de Empresas de Exploração e Produção de Petróleo e Gás. – Rio de Janeiro: IBP, 2021 – (Caderno de boas práticas, v. 2).
410 p. : il. color. ; PDF ; 23 MB.
Formato: e-book em PDF.
Modo de acesso: www.ibp.org.br/biblioteca
ISBN: 978-65-88039-06-9
11. Indústria petrolífera. 2. Perfuração de poços. 3. Resíduos industriais. I. IBP. II. Associação Brasileira de Empresas de Exploração e Produção de Petróleo e Gás. III. ABEP. IV. Título.
CDD 622.338

www.ibp.org.br



IBP - Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás
Avenida Almirante Barroso, 52 - 21º e 26 andares
Centro, Rio de Janeiro-RJ – CEP: 20031-918
Tel.: (+55 21) 2112-9000

O grupo de trabalho para elaboração deste caderno foi composto dos seguintes membros (em ordem alfabética):

Grupo de Trabalho de Fluidos e Cascalhos

Adelci Almeida	José Aina
Adriana Frenkiel	Juliana Padrão
Ana Beatriz Ferreira	Karima Lagraf
Ana Cupelo	Laura Martinelli
Ana Paula Brandão	Leandro Monteiro
Anderson Cantarino	Leonardo Marinho
Andrele Andres	Luciano Mendes
Anidio Correa	Ludmila Sampaio
Anne Guedes	Luiz Claudio Cosendey
Barbara Bosisio	Maíta Moura
Beatriz Mattos	Marcelo Medeiros
Carlos Silva	Maria Eduarda Pessoa
Carolina Coimbra	Patricia Burlini
Claudio Sternberg	Paula Della Nina
Daniel Aquino	Sergio Barbosa
Elaine Goverman	Sonia Lima
Emily Farias	Stella Gomes
Eric Trammell	Wallace Costa
Esdras Albuquerque	
Estevão Rodrigues	
Fernanda Othero	
Geraldo Adriano Teixeira	
Gustavo Arruda	
Gustavo Xavier	
Johanna Amezquita	

Equipe Mott MacDonald

Adeílson Barbosa Nascimento
Bruno Medeiros
Clarissa Lourenço de Araujo
Daniel Tavares Rosa
Domingos Nicolli
Elizabeth do Nascimento Carvalho
Fernando Paiva
Francisco Eduardo Mendes
Karina Reis de Araujo Pontes Ribeiro
Larissa Quaresma do Lago
Leonardo Oliveira Lopes
Mariana Siqueira
Paulo F. Garreta Harkot
Pedro Selig Botafogo
Renata Catherine Gomes do Nascimento
Ricardo Tavares
Tatiana dos Santos Rocha

Agradecimentos

Carlos Henrique Mendes
Fayga Pismel
Maria Augusta Nogueira

Com especial agradecimento a Maria Augusta e Carlos Henrique.

O comprometimento e a dedicação na administração da elaboração deste estudo foram fundamentais para o sucesso!

APRESENTAÇÃO

O comitê de Saúde, Segurança e Meio Ambiente (Health, Safety and Environment) do IBP, doravante referenciado como HSE, foi criado em 1999 para discutir e tratar temas relevantes aos seus associados e à indústria, bem como temas relacionados à conformidade regulatória, no âmbito dos requisitos ambientais, de segurança e de saúde. Subordinados ao comitê estão os grupos de trabalho (GT) criados por demanda para discutir e propor as melhores alternativas técnicas sobre os temas específicos à indústria relacionados aos assuntos pertinentes ao HSE. Apenas no ano de 2018, o IBP como um todo contou com o auxílio técnico de mais de 1.200 profissionais do setor, consultores e acadêmicos.

Diante da inexistência de uma instrução normativa (IN) específica para o tema, no ano de 2002, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis (Ibama) adotou, no que coubesse, procedimentos vigentes na regulação do Golfo do México, para uso de fluidos de perfuração, pastas de cimento e demais fluidos empregados nas atividades de construção de poços marítimos no Brasil, tanto quanto as condições para o descarte no mar desses fluidos e do cascalho gerado na atividade de perfuração. Até recentemente, as regras vigentes eram tratadas por meio de pareceres técnicos emitidos pelo órgão ambiental licenciador (CGMAC/Dilic/Ibama), vinculados às condicionantes de licenças de operação de cada uma das empresas operadoras, para os quais eram constituídos processos administrativos (PA) individualizados.

O tema fluidos de perfuração é discutido no IBP desde 1998, entretanto, em 2009, foi criado um GT específico, vinculado ao comitê de HSE, para discutir itens relativos a condições de descarte de fluidos, cascalho e pastas de cimento nas atividades de perfuração marítima de poços e produção de petróleo e gás, tendo, esse GT, participado de inúmeras reuniões com o grupo técnico do Ibama, sediado no Rio de Janeiro, para elaboração conjunta de uma instrução normativa sobre o tema.

Como parte do processo de colaboração técnica permanente entre os associados do IBP e o Ibama, foi estabelecida a elaboração de um estudo de balanço do custo-benefício de alternativas técnicas e locais para destinação de cascalho e fluidos de perfuração e seus respectivos riscos e impactos associados, intitulado "Avaliação de opções para a destinação do cascalho gerado na perfuração de poços marítimos no Brasil". Tal estudo foi elaborado pelo IBP em conjunto com a consultoria Mott MacDonald e apresentado em cinco fascículos.

Neste fascículo 2 será apresentado no capítulo 1 um levantamento das tecnologias disponíveis para tratamento e destinação de resíduos de perfuração em terra.

No capítulo 2 deste fascículo será utilizada a metodologia de Análise Preliminar de Perigos (APP) para a avaliação dos riscos de cada método de tratamento e destinação de resíduos para atendimento ao cenário de descarte zero, e são listados os possíveis cenários acidentais e ocupacionais identificados durante a aplicação da APP.

SUMÁRIO

Apresentação	4
1. Controle, tratamento e destinação à terra	10
1.1 Transporte marítimo para disposição em terra	10
1.2 Alternativas de tratamento em terra	12
1.2.1 Processos térmicos	12
1.2.1.1 Dessorção térmica	12
1.2.1.2 Termomecânica	14
1.2.1.3 Calor indireto (tambor rotativo aquecido)	15
1.2.1.4 Micro-ondas (incidência direta)	16
1.2.1.5 Incineração	18
1.2.2 Tratamento químico	21
1.2.2.1 Solidificação e estabilização (encapsulamento)	21
1.2.2.2 Separação de fases (processamento)	22
1.2.3 Tratamento biológico	24
1.2.3.1 <i>Landfarming</i>	24
1.2.3.2 Compostagem	26
1.2.4 Recondicionamento	32
1.2.5 <i>Dewatering</i>	33
1.3 Alternativas de reutilização e aproveitamento energético	35
1.3.1 Reutilização	36
1.3.1.1 Utilização na construção civil	36
1.3.1.2 Agregação em artefatos cerâmicos	37
1.3.1.3 Agregação em artefatos de cimento	37
1.3.1.4 Pavimentação de vias	38

1.3.2	Aproveitamento energético	38
1.3.2.1	Coprocessamento de resíduos	38
1.3.2.2	<i>Waste to energy</i> (WTE)	41
1.4	Alternativas de disposição final	43
1.4.1	Disposição em cavernas de sal	43
1.4.2	Disposição em aterro industrial	45
1.4.2.1	Aterro classe I	46
1.4.2.2	Aterro classe II	47
2.	Análise preliminar quantitativa da viabilidade social, ambiental, econômica e de segurança ocupacional e operacional das alternativas tecnológicas	49
2.1	Elementos determinantes para seleção das alternativas de tratamento e destinação de resíduos	51
2.1.1	Tipologia de resíduos	51
2.1.2	Transporte e destinação	52
2.1.3	Limitações de infraestrutura	52
2.1.4	Limitações e restrições regulamentares	54
2.2	Resultado da análise qualitativa da viabilidade	56
3.	Anexo I	60
	Documentos de referência	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Etapas de envio dos resíduos ao continente	12
Figura 2	Ilustração do processo de dessorção térmica	13
Figura 3	Modelo de unidade de dessorção térmica a baixa temperatura	14
Figura 4	Modelo de unidade de dessorção por calor indireto	16
Figura 5	Unidade experimental composta por micro-ondas, condensador e painel de controle	17
Figura 6	Processo de utilização de micro-ondas na limpeza de cascalho	18
Figura 7	Exemplo de forno de incineração	20
Figura 8	Esquema de processo de estabilização de cascalho	22
Figura 9	Exemplo de unidade de separação de sólidos	23
Figura 10	Esquema típico de <i>landfarming</i>	24
Figura 11	Áreas típicas utilizadas para <i>landfarming</i>	25
Figura 12	Ilustrações do sistema de leiras revolvidas	28
Figura 13	Ilustrações do sistema de pilhas estáticas aeradas	29
Figura 14	Esquema de alguns tipos de biorreatores	30
Figura 15	Vermicompostagem	32
Figura 16	Modelo de <i>layout</i> de planta de <i>dewatering</i>	35
Figura 17	Esquema do coprocessamento	40
Figura 18	Exemplo de unidade de coprocessamento	40
Figura 19	Esquema de usina lixo-energia padrão de incineração em grelha	42
Figura 20	Diagrama esquemático da injeção do cascalho em cavernas de sal	44
Figura 21	Esquema do processo de disposição dos resíduos em cavernas de sal	45
Figura 22	Exemplos de aterro industrial	47
Figura 23	Processos envolvidos em diferentes alternativas de destinação de cascalho de perfuração marítima	50

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1	Quantitativo de unidades destinadoras de resíduos	53
Quadro 2	Resumo dos impactos comuns a todas as técnicas de destinação final em terra em comparação ao descarte no mar	58
Quadro 3	Análise da viabilidade das alternativas tecnológicas de tratamento e destinação final de resíduos no cenário brasileiro	59

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CCO	Ciclo combinado otimizado
Cetesb	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
DQO	Demanda química de oxigênio
FPBA	Fluido de perfuração de base aquosa
FPBNA	Fluido de perfuração de base não aquosa
IOGP	International Association of Oil et Gas Producers
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RSU	Resíduos sólidos urbanos
Sisnama	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SNVS	Sistema Nacional de Vigilância Sanitária
STB	<i>Stirred tank bioreactor</i>
STR	<i>Stirred tank reactor</i>
Suasa	Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária

1 CONTROLE, TRATAMENTO E DESTINAÇÃO À TERRA

Em função da diversidade de tecnologias disponíveis para tratamento e destinação de resíduos de perfuração em terra, para a definição da melhor alternativa a ser adotada para o cenário de descarte zero, é essencial aprofundar o entendimento da complexidade das técnicas e das particularidades dos resíduos, conhecer os riscos ambientais e de segurança envolvidos, bem como os custos e impactos operacionais do envio destes ao continente, ou mesmo do seu descarte no mar.

A complexidade de tal operação está relacionada ao grande volume de fluidos residuais e cascalho gerados que, com a implementação de regras mais restritivas quanto ao descarte no mar, deverão ser enviados para a terra. Sendo assim, o aumento do volume afetará a cadeia logística (espaço na sonda e nas embarcações de apoio), podendo gerar, em um primeiro momento, gargalos operacionais ao recebimento, transporte, tratamento e destinação final *onshore*.

De acordo com o *Drilling waste management technology review*, publicado pela IOGP (2016), a definição da estratégia a ser seguida para o tratamento e destinação final dos resíduos em terra pode ser influenciada por diversos fatores, destacando-se: tipo de fluido utilizado, infraestrutura de recebimento e armazenamento, tratamento e destinação final, logística e legislação.

No tocante à aplicação mundial das tecnologias de tratamento e destinação de resíduos de perfuração, cabe frisar que o mercado é bastante dinâmico; sendo assim, alterações da legislação ambiental no sentido de estabelecer parâmetros cada vez mais restritivos, a mudança na tipologia de fluidos e produtos empregados e a adequação às boas práticas da indústria impulsionam a busca ou substituição das tecnologias já empregadas por outras cada vez mais avançadas. Dessa forma, este relatório procurou integrar as informações mais recentes do mercado de E&P.

Cabe destacar que será apresentado no anexo 1 o quadro síntese das informações levantadas para cada uma das metodologias adiante descritas.

1.1 Transporte marítimo para disposição em terra

Caso o descarte na unidade marítima não seja possível, será necessário transportar os fluidos e cascalho da locação de perfuração até um local adequado em terra. Cabe destacar que, previamente ao transporte marítimo, o fluido e o cascalho já terão passado pelo pré-tratamento a bordo da unidade de perfuração, realizado pelo sistema de controle de sólidos e da centrífuga vertical.

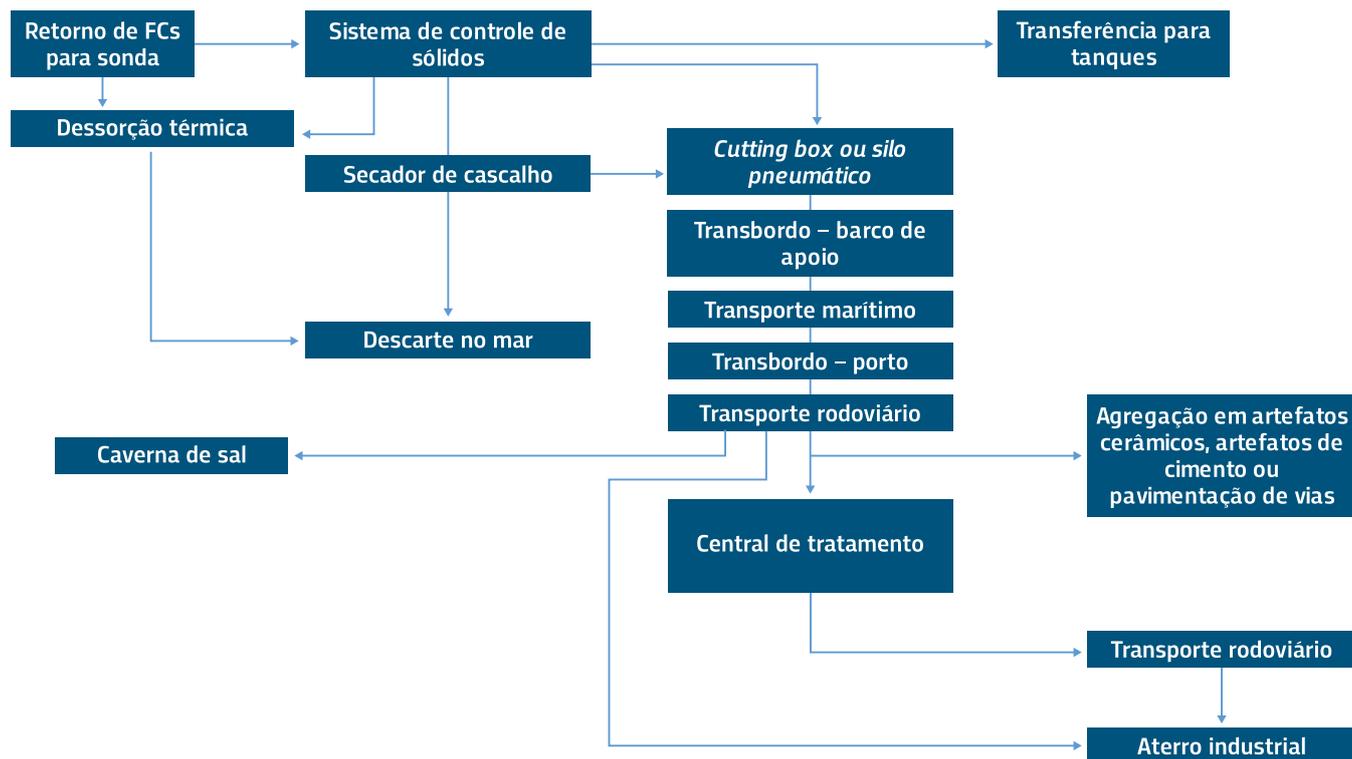
O manuseio do cascalho exigirá equipe e equipamentos adicionais, incluindo unidades pneumáticas ou roscas transportadoras para auxiliar no transporte do cascalho para as unidades de armazenamento ou carregamento. Dependendo do volume de cascalho que está sendo gerado, da capacidade de armazenamento da plataforma de perfuração e da logística das operações de transporte marítimo, o cascalho pode ser armazenado e/ou transportado em *cutting boxes* ou *skips* ou em contêineres a granel.

Frequentemente, a operação de transferência de cascalho para a terra é chamada de *skip & ship*. O gerenciamento da logística do transporte e o armazenamento de cascalho com as embarcações disponíveis pode ser uma tarefa complexa (CAPP, 2001). Uma vez descarregado em terra, o cascalho é transportado conforme necessário para outro local, onde passa por processamento adicional antes de ser descartado ou reciclado para usos alternativos. As opções de tratamento em terra serão discutidas mais adiante neste documento.

De forma geral, pode-se dividir as etapas para envio dos resíduos para a terra da seguinte maneira (figura 1):

- » direcionamento e armazenamento do cascalho oriundo do sistema de controles de sólidos em contêineres (*cutting boxes*) ou em silos pressurizados, dependendo do sistema adotado;
- » transbordo dos contêineres cheios para uma embarcação de apoio marítimo por meio de guindastes, no caso de *cutting boxes*, ou transferência a vácuo do cascalho para tanques nas embarcações no caso de sistemas pressurizados de armazenamento e transferência;
- » transporte marítimo do cascalho e contêineres até a costa;
- » transbordo dos contêineres para uma base portuária: com guindastes (*cutting boxes*) ou sistema de transferência pneumática a partir dos silos da embarcação (sistema pressurizado);
- » armazenamento temporário dos resíduos na base portuária;
- » carregamento do cascalho e contêineres para os caminhões ou carretas de transporte rodoviário;
- » transporte rodoviário do cascalho para instalações de tratamento ou destinação final;
- » caso sigam para centrais de resíduos, equipamentos nas instalações descarregam o cascalho dos caminhões, podendo ser utilizado maquinário para o manuseio dos resíduos, como tratores e moedores;
- » transporte do cascalho para disposição em aterro de resíduos, conforme sua classificação: classe I (resíduo perigoso) ou classe II (resíduo não perigoso);
- » limpeza e transporte terrestre das *cutting boxes* vazias de volta ao porto;
- » transporte marítimo das *cutting boxes* vazias até as sondas de perfuração;
- » transbordo das *cutting boxes* vazias da embarcação de apoio para a sonda de perfuração.

Figura 1 – Etapas de envio dos resíduos ao continente



Fonte: Mott MacDonald, 2019.

1.2 Alternativas de tratamento em terra

A seguir, serão apresentadas as alternativas existentes para tratamento dos resíduos em terra, separadas em: processos térmicos, tratamentos químicos, tratamentos biológicos e o acondicionamento.

1.2.1 Processos térmicos

A separação dos hidrocarbonetos e/ou da base sintética agregada ao cascalho se dá principalmente por processos térmicos.

1.1.2.1 Dessorção térmica

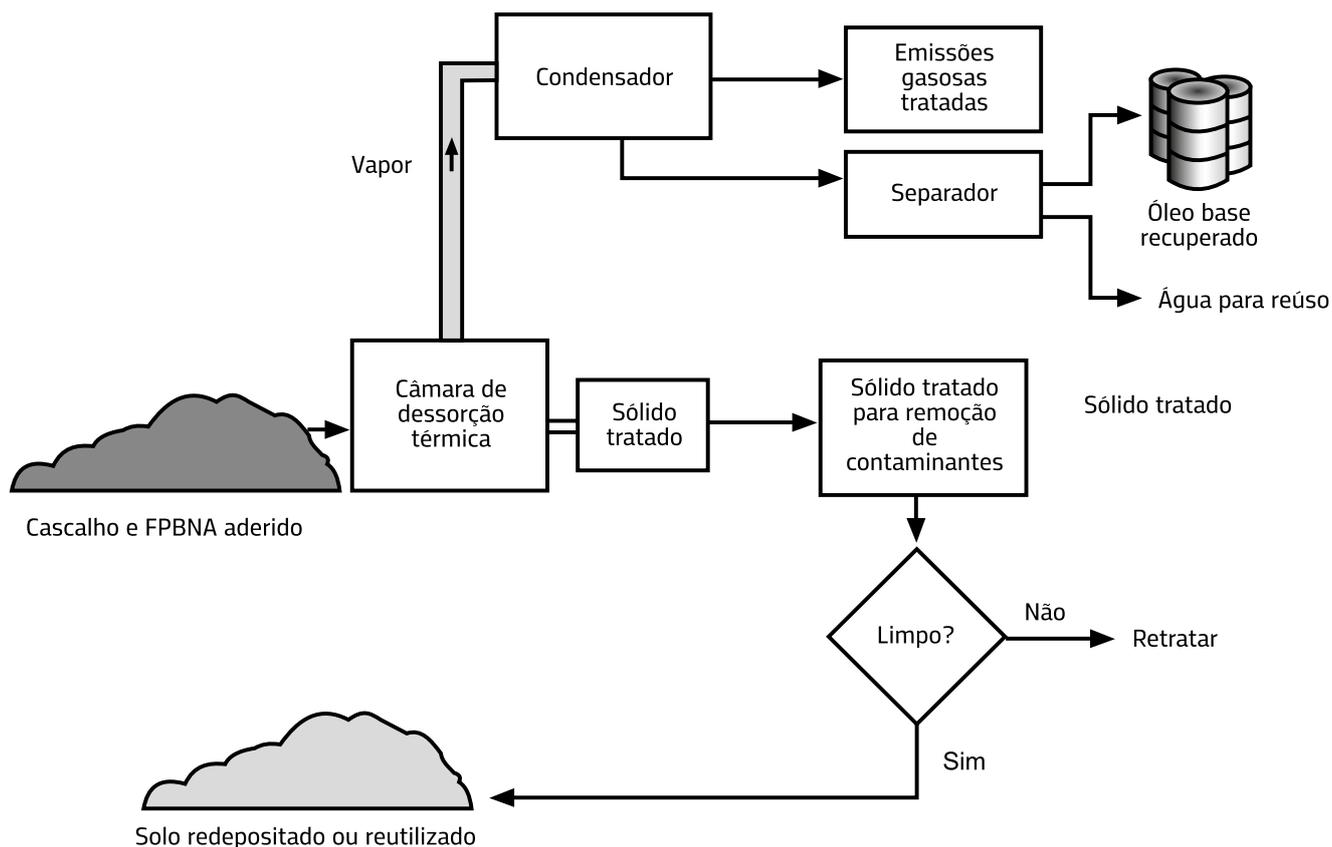
Dessorção térmica ou separação térmica de fases (TPS) é uma técnica que aplica calor ao cascalho, ou a qualquer outro material oleoso, para separar e coletar o FPBNA. Qualquer processo que queime o óleo ou não colete e recupere o óleo, não é considerado dessorção térmica. Essa tecnologia vem sendo utilizada na Venezuela, Equador, Cazaquistão, Canadá e Estados Unidos (CAPP, 2001). No Brasil, em São Paulo, se tem registro de utilização da dessorção térmica para tratamento de solo contaminado por produtos derivados de petróleo, como gasolina, óleo diesel, querosene e outros.

Por se tratar de tecnologia recente e pouco disseminada no país, não existem legislação ou normas específicas do processo de dessorção térmica, de modo que tanto o órgão de controle ambiental do estado de São Paulo (Cetesb) como a empresa que presta o serviço de dessorção térmica no Brasil norteiam-se por legislações e normas aplicadas a processos térmicos como a incineração, sendo as diretrizes da Resolução Conama nº 316/2002 aplicadas aos procedimentos operacionais, limites de emissão, critérios de desempenho, controle, tratamento e disposição de efluentes da atividade

e a norma ABNT NBR 11.175/1990 para as condições exigíveis de desempenho do equipamento para resíduos sólidos perigosos (LUNA, 2008).

Durante o tratamento térmico, o aquecimento do cascalho volatiliza o líquido que é liberado. Os vapores são coletados, resfriados e condensados, sendo então separados em fases aquosa e oleosa. Assim, a dessorção térmica é um tratamento de separação que resulta em três correntes distintas: água, óleo e sólidos. Cada um desses fluxos requer um descarte ou opção de reutilização específicos. A figura 2 ilustra o processo de dessorção térmica.

Figura 2 – Ilustração do processo de dessorção térmica



Fonte: Adaptado de *DWM planning guide* – M-I Swaco, 2005.

Normalmente, a fase aquosa é usada para resfriar e retornar a umidade para a corrente de sólido. Se for gerado excesso de água no processo, algum método de disposição final da água deve ser considerado. Normalmente, o fluxo sólido é enviado para um aterro para descarte ou reutilizado em algum processo. Já a fase não aquosa pode ser recuperada e transformada em um novo sistema de fluido de perfuração.

Dois tipos de processos evoluíram: a baixa e a alta temperatura. Processos a baixa temperatura usualmente possuem temperatura de trabalho de 250°C a 350°C, enquanto os de alta temperatura podem atingir valores superiores a 500°C. Processos a baixa temperatura são preferidos porque as temperaturas mais altas tendem a quebrar as moléculas do óleo e criar compostos perigosos de hidrocarbonetos (figura 3). No entanto, processos a alta temperatura são mais rápidos e tendem a remover mais compostos de hidrocarbonetos.

Figura 3 – Modelo de unidade de dessorção térmica a baixa temperatura



Fonte: IOGP, 2016.

O desempenho de um sistema de dessorção térmica depende de vários fatores, incluindo: proporções de óleo, água e sólidos no cascalho, potência da unidade e temperatura da câmara de dessorção (IOGP, 2016). A vantagem da dessorção térmica está na remoção do fluido base do cascalho processado, sem comprometer suas propriedades físico-químicas. Este é o único método que pode atingir concentrações muito baixas de óleo no cascalho. Porém apenas o FPBNA é removido, ao passo que componentes mais refratários como sal e metais pesados ainda permanecem na corrente de sólido.

A principal desvantagem desse processo é que, ao final, permanece um volume de sólido que necessita de descarte apropriado. Durante o tratamento de dessorção térmica, a estrutura do sólido é comprometida, o que limita o seu reúso. Geralmente, o destino desse sólido é a disposição em aterro industrial.

Outra desvantagem do processo é o seu elevado custo, que em parte é mitigado pelo possível reúso do FPBNA. Caso o reúso não seja viável, o FPBNA deverá também sofrer disposição final. Nesse cenário, o uso da tecnologia é questionável.

1.2.1.2 Termomecânica

A dessorção termomecânica *onshore* é um sistema de tratamento térmico que produz calor a partir de fricção, resultando na evaporação dos fluidos. A técnica funciona tal qual sua versão *offshore*, descrita no item 2.1.2.2 Dessorção termomecânica (*hammermill*), apresentado anteriormente no fascículo 1.

Embora a dessorção termomecânica *onshore* não seja aplicada no cenário brasileiro, ela é considerada como uma alternativa para tratamento de resíduos de perfuração nos Estados Unidos e Noruega.

Atualmente, a Noruega tem várias instalações que tratam cascalho com FPBNA usando a tecnologia *hammermill*, mas a maioria dessas instalações é utilizada para tratar, principalmente, uma mistura de resíduos de perfuração oleosa, sólidos e *slops*. O *slop* é uma mistura de óleo/água que não contém fragmentos de cascalho da perfuração. A capacidade de uma instalação de *hammermill* depende da capacidade do seu motor, mas uma proporção significativa do consumo de energia depende de mudanças na quantidade de água a ser convertida do líquido para a fase gasosa e, portanto, do teor de óleo e água do cascalho. Para manter a capacidade constante durante o tratamento deve-se alimentar o equipamento com cascalho o mais seco possível, diminuindo a energia necessária à vaporização.

Outra descrição comum para esse tipo de moinho termomecânico é *rotormill*. O processo de *start-up* da operação ocorre pela alimentação do equipamento com areia e, uma vez que se atinge uma temperatura suficientemente alta, o cascalho a ser tratado é adicionado. A fase líquida vaporiza, condensa e é separada em tanques dedicados para água e óleo. O cascalho é alimentado continuamente no moinho quando a temperatura desejada é atingida. A matéria seca resultante, em outras palavras, o cascalho seco, é descartada de forma apropriada, de acordo com as propriedades obtidas após o tratamento. Todo o processo é executado automaticamente com o uso de sistema controlador lógico programável (CLP). O fluido base é recuperado e a água é tratada, caso necessário, antes de ser descartada.

É importante ressaltar que, segundo Stephenson (2004), nenhuma das unidades de dessorção produz emissões gasosas ou líquidas da água evaporada ou vapores de óleo, pois assume-se que tudo é recuperado, não havendo descartes.

1.2.1.3 Calor indireto (tambor rotativo aquecido)

Nesta tecnologia, a unidade de dessorção térmica é do tipo tambor rotativo (figura 4), que é externamente aquecido por queimadores e selado para evitar a formação de misturas explosivas.

A tecnologia está disponível no Cazaquistão e na Venezuela, mas sem registro de utilização no Brasil; sendo assim, sua aplicação dependerá de processo de importação de equipamento.

O tambor é inclinado; o cascalho é alimentado na extremidade mais alta para tratamento e depois descarregado na extremidade inferior. O vapor é alimentado por um condensador de dois estágios para produzir correntes separadas de óleo e água (STEPHENSON, 2004).

O óleo é normalmente reutilizado como combustível ou retorna ao fornecedor de fluido para reúso. A água destilada pode ser usada para controle de poeira do cascalho tratado ou pode ser descartada. A unidade pode operar em uma gama variada de temperaturas, limitada somente pelo projeto e composição do tambor. Normalmente as unidades operam a 315°C, mas podem operar em uma faixa de temperatura entre 150 e 560°C (STEPHENSON, 2004).

O equipamento pode chegar a uma capacidade de 2t/h, obtém teores de fase orgânica residual entre 0,3 e 1% e, pelo fato de apresentar temperaturas de operação altas, pode ser categorizado como *high temperature thermal desorption* (HTTD).

De acordo com a IOGP (2016), a dessorção por calor indireto pode ser relativamente ineficiente e a transferência de calor difícil de controlar. Os sistemas que utilizam fluido térmico para transferir calor de uma fonte externa para o interior da câmara são mais eficientes e controláveis.

Figura 4 – Modelo de unidade de dessorção por calor indireto



Fonte: Halliburton, 2019.

É importante ressaltar que, segundo Stephenson (2004), essa técnica não produz emissões gasosas ou líquidas da água evaporada ou vapores de óleo, pois assume-se que tudo é recuperado pelo sistema lavador de gases.

1.2.1.4 Micro-ondas (incidência direta)

No âmbito da gestão de resíduos de perfuração, o tratamento por micro-ondas é avaliado como uma tecnologia inovadora (figura 5) que está sendo desenvolvida para atendimento a legislações ambientais rigorosas e que, frente à necessidade de redução de custos, permite a otimização da separação e reutilização dos fluidos de perfuração (PEREIRA, 2013).

Atualmente se tem registro de utilização dessa técnica em escala piloto para tratamento de resíduos de perfuração no Reino Unido (University of Nottingham), Dinamarca e Escócia. Em escala comercial, a empresa Scomi Energy's destaca-se como a vanguarda no desenvolvimento da tecnologia de micro-ondas para o tratamento de cascalho de perfuração. No Brasil, a técnica vem sendo empregada em escala comercial para tratamento de cascalho de perfuração apenas no Rio de Janeiro (IOM3, 2019; HL-INVEST, 2014). Para o emprego dessa técnica não são encontradas limitações normativas ou legislação específica. Como não há emissões durante o processo, o licenciamento ambiental dessas unidades acaba sendo mais simples que em outros processos térmicos.

Figura 5 – Unidade experimental composta por micro-ondas, condensador e painel de controle

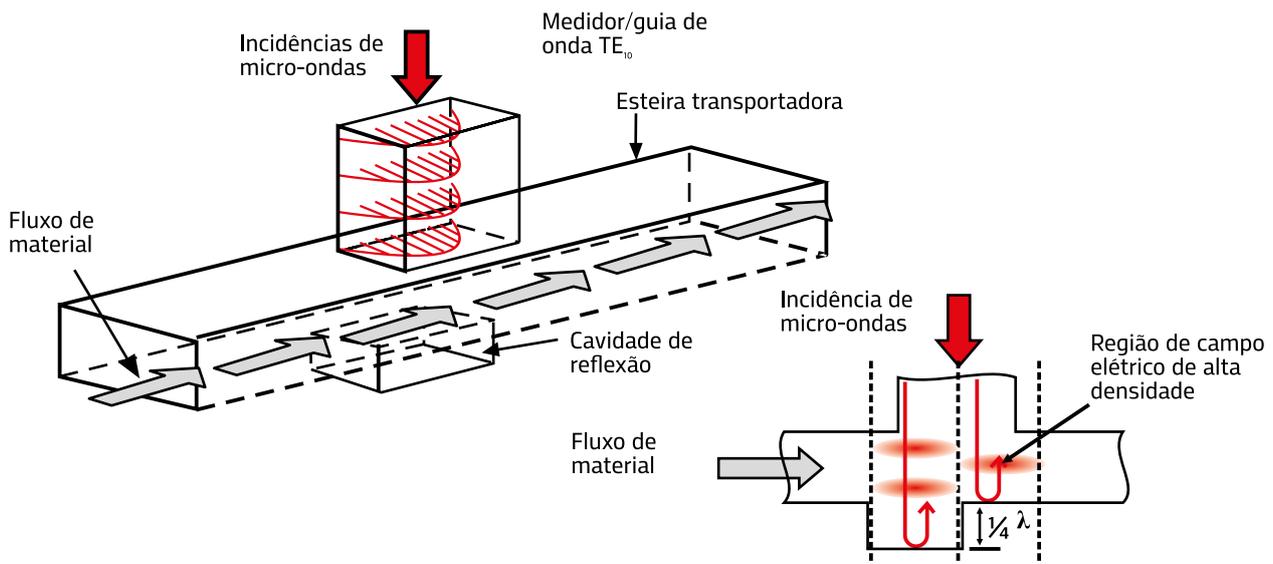


Fonte: Pereira et al., 2013.

A figura 6 apresenta um esquema do funcionamento do tratamento térmico por micro-ondas. Neste método, a energia é fornecida diretamente aos materiais por meio da interação molecular com o campo eletromagnético formado por micro-ondas. Dessa forma, a distribuição de temperatura interna não é limitada pela condutividade térmica do material, reduzindo o tempo de aquecimento para menos de 1% do tempo necessário pelos métodos tradicionais de aquecimento. Os materiais podem ser classificados em três categorias em relação à sua interação com um campo de micro-ondas: i) transparentes: as micro-ondas passam pelo material com pouca absorção (baixo fator de perda dielétrica); ii) opacos: atuam como condutores, as micro-ondas são refletidas e não são absorvidas pelo material; e iii) absorventes: as micro-ondas são absorvidas com base na intensidade do campo eletromagnético e o fator de perda dielétrica (ROBINSON et al., 2010).

O processamento baseado em micro-ondas apresenta vantagens para o tratamento de materiais que contêm uma mistura de material absorvente e transparente, caso do cascalho que possui fluido aderido e água. Nesse caso, ocorre o aquecimento seletivo das substâncias com alto fator de perda dielétrica (absorventes) e passam através dos materiais com baixo fator de perda dielétrica, resultando em uma economia de energia. Somente a água é aquecida, não sendo necessária energia para aquecimento de toda a matriz, composta principalmente pelo cascalho e base orgânica aderida (ROBINSON et al., 2010).

Figura 6 – Processo de utilização de micro-ondas na limpeza de cascalho



Fonte: Pereira, 2010.

Praticamente toda a água livre do material é removida durante o processo, enquanto a base orgânica continua a ser removida mesmo após a evaporação da água (PEREIRA, 2013). O óleo e a água recuperados são separados por gravidade, após a destilação.

Essa metodologia é bastante influenciada por parâmetros como temperatura, concentração inicial de fluido, massa de cascalho, tipo de rocha e energia específica aplicada. Há indicações de que a temperatura de controle não afeta a eficiência de remoção da base orgânica, mas pode afetar a qualidade do material recuperado, com degradação química associada ao aumento da temperatura (PEREIRA, 2013; PETRI JUNIOR, 2014).

De acordo com Decareau e Peterson, 1986; Metaxas e Meredith, 1983 apud Almeida, 2016, algumas vantagens relacionadas à utilização da energia de micro-ondas compreendem o aquecimento instantâneo do material, a eficiência na conversão de energia, menores tempos de operação e, em muitos casos, obtenção de um produto final de qualidade superior.

1.2.1.5 Incineração

A incineração é uma técnica amplamente adotada para o gerenciamento de diferentes tipos de resíduos perigosos e não perigosos (figura 7). No entanto, é uma opção raramente usada no hemisfério ocidental para o tratamento de cascalho e fluido de perfuração. Quando selecionado, o motivo geralmente é porque é a única opção viável disponível. Recentemente, tem-se registro de sua aplicação para descarte de resíduos de perfuração gerados pelas operações da Eastern Sable Offshore Energy Inc. (SOEI) no leste do Canadá (CAPP, 2001). No Brasil, a técnica é aplicada a resíduos da atividade de perfuração nos estados do Pará, Maranhão, Ceará, Bahia, Rio de Janeiro e Santa Catarina.

Os incineradores podem ser instalações autônomas dedicadas à queima de lixo ou instalações de coprocessamento que usam os resíduos como um de seus combustíveis.

Os diferentes tipos de incineradores de resíduos incluem (DEFRA, 2007 apud IOGP, 2016):

- » Sistemas de grelha: incluem o forno de grelha móvel, sistema de combustão mais utilizado para a incineração de resíduos municipais de alto rendimento. O lixo é lentamente impulsionado através da câmara de combustão (forno) por uma grelha acionada mecanicamente. Os resíduos entram continuamente por uma extremidade do forno e as cinzas são em seguida descarregadas na outra. O sistema está configurado para permitir a combustão completa à medida que o lixo se move pelo forno. As condições do processo são controladas para otimizar a combustão dos resíduos, para garantir a combustão completa da alimentação. A extremidade da grelha normalmente passa a cinza quente por um sistema de refrigeração. Sistemas de grelha fixa normalmente são menores e mais usados em localizações remotas e plantas móveis.
- » Leito fluidizado: a combustão é normalmente um processo de estágio único e consiste em uma câmara com um leito de borbulhamento granular de um material inerte, como areia/sílica, ou meio de leito similar. O leito é “fluidizado” pelo ar (que pode ser diluído com gás de combustão reciclado), soprado verticalmente no material a uma alta taxa de fluxo. Os resíduos são mobilizados pela ação do leito fluidizado de partículas. A utilização da tecnologia de leito fluidizado para a incineração é relativamente limitada, apesar de ser amplamente aplicada em lodo de esgoto.
- » Forno rotativo: a incineração em forno rotativo é normalmente um processo de dois estágios, composto por um forno e uma câmara de combustão secundária separada. O forno é a câmara de combustão primária e é inclinado para baixo a partir do ponto de entrada. A rotação movimenta os resíduos através do forno, expondo-os ao calor e oxigênio. Fornos rotativos são usualmente usados para incineração de resíduos perigosos.

Segundo Machado (2015), atualmente as técnicas de incineração mais utilizadas são: *mass burning* e *refuse-derived fuel*. Na primeira, os resíduos são incinerados sem qualquer pré-tratamento. Na segunda, os resíduos são previamente processados com o objetivo de remover materiais recicláveis e minimizar a heterogeneidade. Entre estas, a mais frequentemente utilizada é a *mass burning*, por requerer menos etapas.

A incineração emprega altas temperaturas (média de 900°C) em fornos para converter os resíduos em cinzas, gases e calor (IBP, 2014; ARARAUNA JR e BURLINI; 2014). Dessa forma, possibilita redução significativa de volume e massa (de 60 a 90%), detoxificação, inertização do resíduo e recuperação de energia (NETO, 2017).

Os incineradores de resíduos podem impactar a qualidade do ar devido à liberação de gases tais como: dióxido de enxofre (SO₂), ácido clorídrico e ácido fluorídrico (HCl e HF), óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO), vapor de água e dióxido de carbono (CO₂), bem como outros gases do efeito estufa e metais pesados. Dessa forma, requerem controle cuidadoso das condições de combustão, incluindo, normalmente, a utilização de equipamentos de controle de poluição do ar, como filtros e purificadores. As saídas de um incinerador são: resíduos do controle de poluição do ar (também chamados de cinzas voláteis) e cinzas de fundo ou clínquer. As águas residuais do sistema de limpeza de gases de combustão podem ser tratadas de forma separada em uma estação de tratamento

de águas residuais, se não houver acesso direto a uma estação de tratamento de águas residuais municipais. Os resíduos costumam ser dispostos da seguinte forma:

- » clínquer: direcionado a aterro seguro;
- » cinzas voláteis: direcionadas a aterro seguro;
- » águas residuais: direcionadas à estação de tratamento.

Negrão e Almeida (2010) destacam que altas concentrações de resíduos orgânicos – ou lixo úmido – diminuem o potencial calorífico dos resíduos, o que aumenta a quantidade de energia necessária para a incineração e, conseqüentemente, representa um maior custo de manutenção das usinas.

A adoção desse método, de acordo com a Resolução Conama nº 316/2002, deverá ser precedida de um estudo de análise de alternativas tecnológicas que comprove que a escolha da tecnologia adotada está de acordo com o conceito de melhor técnica disponível.

A queima, mesmo eficiente, gera emissões, resíduos e efluentes, que devem ser tratados e destinados conforme a legislação regulatória. Segundo Negrão e Almeida (2010), mesmo com a tecnologia que é empregada nos filtros das chaminés, a emissão dos gases durante a incineração não é reduzida a níveis seguros, principalmente a dioxina. Além disso, as cinzas restantes do processo de queima também são bastante tóxicas. Sendo assim, de forma geral, as emissões são controladas por um sistema de controle de emissões. Já os resíduos (cinzas e escórias) são enviados para aterro industrial e os efluentes para uma estação de tratamento de efluentes, de forma a atender à legislação aplicável, incluindo a Resolução Conama nº 430/2011.

Figura 7 – Exemplo de forno de incineração



Fonte: VG Resíduos, 2018.

O processo de incineração deve atender à ABNT NBR 11.175/1990, que fixa as condições de desempenho de equipamentos para incineração de resíduos sólidos perigosos.

Em relação à sua aplicabilidade no mercado de O&G, o valor por quilograma (aproximadamente R\$ 6.500,00/tonelada) destinado, quando comparado à dessorção térmica (aproximadamente R\$ 450,00/tonelada), apresenta-se como uma barreira econômica para sua adoção. Um dos fatores que corrobora para os altos custos é a necessidade de um eficiente sistema de controle das emissões, preconizado no artigo 27, da Resolução Conama nº 316/2002.

1.2.2 Tratamento químico

Como alternativas de tratamento químico para cascalho e fluido de perfuração, temos a solidificação e estabilização (encapsulamento) e a separação de fases (processamento). Essas técnicas são detalhadas a seguir.

1.2.2.1 Solidificação e estabilização (encapsulamento)

A solidificação e estabilização (S/E), também chamada muitas vezes de encapsulamento e/ou fixação, é utilizada como alternativa de tratamento para resíduos empregando aditivos para reduzir a mobilidade dos poluentes, de forma a transformá-los em materiais não perigosos ou aceitáveis para as normas de disposição vigentes (MELCHERT, 2012). Embora não se tenha registro de sua aplicação no Brasil para cascalho e fluido de perfuração, esta técnica é amplamente utilizada em países tais como Argélia, Colômbia, Estados Unidos (Texas e Louisiana), Equador e Venezuela.

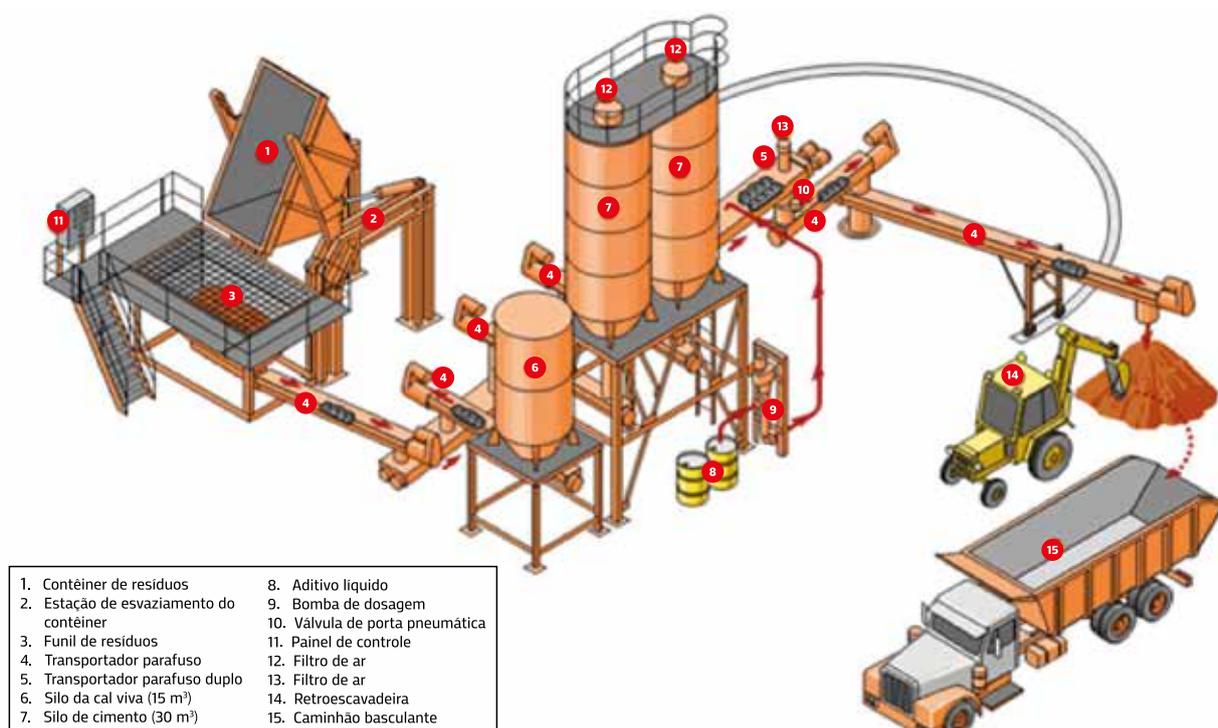
De acordo com a IOGP (2016), a estabilização é uma técnica adequada para imobilizar lamas aquosas para produzir um produto hidrofóbico em pó, que pode ser compactado, e pode ser realizado por ajuste de pH para criar um produto com baixo risco (figura 8). A estabilização é a transformação química dos contaminantes em formas menos tóxicas e menos solúveis. Neste processo, a natureza física e as características de manuseio do resíduo não são necessariamente transformadas (MELCHERT, 2012).

Já a solidificação se refere às técnicas que encapsulam o resíduo em um sólido monolítico de alta integridade estrutural. A encapsulação pode ser de partículas pequenas do resíduo (microencapsulação) ou de um grande bloco ou contêiner de resíduo (macroencapsulação) (SILVA, 2007). O autor ressalta ainda que os processos de solidificação e estabilização são métodos não destrutivos de imobilizar os constituintes perigosos presentes em um resíduo, porém não removendo ou reduzindo a sua quantidade.

Os métodos de solidificação e estabilização envolvem a adição de reagentes aos resíduos de perfuração, exigindo um método de mistura, tipicamente retroescavadora *in situ* (que utiliza equipamento e mão de obra mínimos) ou mistura *ex situ* de aragem, relatadas para aumentar a eficiência no processo de mistura e maximizar o contato aditivo.

Após a solidificação e estabilização, os resíduos de perfuração estão potencialmente adequados para uma variedade de finalidades de construção, seja no local ou externamente; assim, a tecnologia fornece um caminho para reduzir os efeitos ambientais das operações de perfuração, transportando menos material para fora do local e evitando a disposição dos resíduos em aterro, ou permitindo que os resíduos atendam aos critérios de aceitação do aterro (IOGP, 2016).

Figura 8 – Esquema de processo de estabilização de cascalho



Fonte: Modificado de M-I Swaco apud IOGP, 2016.

1.2.2.2 Separação de fases (processamento)

Conjunto de processos que envolve tratamento físico, químico e térmico, a depender da etapa e objetivo. Há registro de emprego da separação por processos físicos e químicos (empregando emulsificantes) na Escócia. No Brasil, ela é feita utilizando o micro-ondas (na etapa de tratamento térmico) no estado do Rio de Janeiro. Para emprego desta técnica não são encontradas limitações normativas ou legislação específica.

Aplicável aos fluidos de perfuração, o processamento visa obter três fases distintas: óleo, água e sólidos.

O óleo pode ser tanto da formação quanto a base sintética da composição original do fluido.

Os sólidos podem ser fragmentos finos da formação, barita/baritina ou outros componentes utilizados na formulação do fluido.

A água é aquela adicionada para preparação do fluido (emulsão inversa).

A separação de fases consiste nos seguintes equipamentos:

- » centrífugas horizontais (*decanters*) de diferentes tipos, para extração de sólidos de granulometrias diversas. *Mud cleaners* também podem ser utilizados;
- » aquecedor por calor direto ou indireto, para aumento da temperatura e maior facilidade na quebra da emulsão mediante a adição de surfactantes;

- » centrífugas verticais de disco, para extração do óleo;
- » estação de tratamento de efluentes industriais (Etei) para tratamento da água resultante do processo.

Cada uma das fases tem uma destinação distinta, a saber:

- » óleo: reciclagem;
- » sólidos: após a separação, os sólidos têm baixa umidade (estado de “pasta”), mas existe contaminação com óleo e alto teor de cloreto. O processo de dessorção térmica é o tratamento mais indicado para esta fase, extraindo o óleo agregado e o restante da água (figura 9);
- » água: com alto teor de cloreto e alta demanda química de oxigênio (DQO), o tratamento não é trivial.

Considerando a necessidade de redução da carga orgânica da água proveniente da separação, bem como seu alto teor de cloretos, o tratamento é desafiador.

Se existe a possibilidade de forte diluição desse efluente num meio biológico de alta vazão (ex.: estação de tratamento de esgotos, por exemplo), o impacto dessas características químicas nocivas é atenuado. Porém, sistemas biológicos mais simples para baixar a DQO são afetados pelos cloretos e sistemas exclusivamente físico-químicos não têm eficiência na redução da carga orgânica.

Esse impasse pode ser resolvido com a adoção da eletrofloculação que, conjugada com processos químicos reduz a DQO, sem depender de um processo biológico. O meio condutivo, devido à presença de cloretos, acaba por facilitar o tratamento em vez de inviabilizá-lo.

Figura 9 – Exemplo de unidade de separação de sólidos



Fonte: Alliance Ambiental, 2019.

1.2.3 Tratamento biológico

De acordo com Ararauna Jr. e Burlini (2014), compostos presentes em resíduos podem ser convertidos com processos biológicos em dióxido de carbono e vapor d'água, sendo a velocidade dessa transformação influenciada pelos seguintes fatores:

- » disponibilidade de microrganismos degradadores de hidrocarbonetos;
- » disponibilidade de oxigênio, visto que a decomposição aeróbica é mais rápida;
- » disponibilidade de micro e macronutrientes;
- » umidade, temperatura, pH e salinidade.

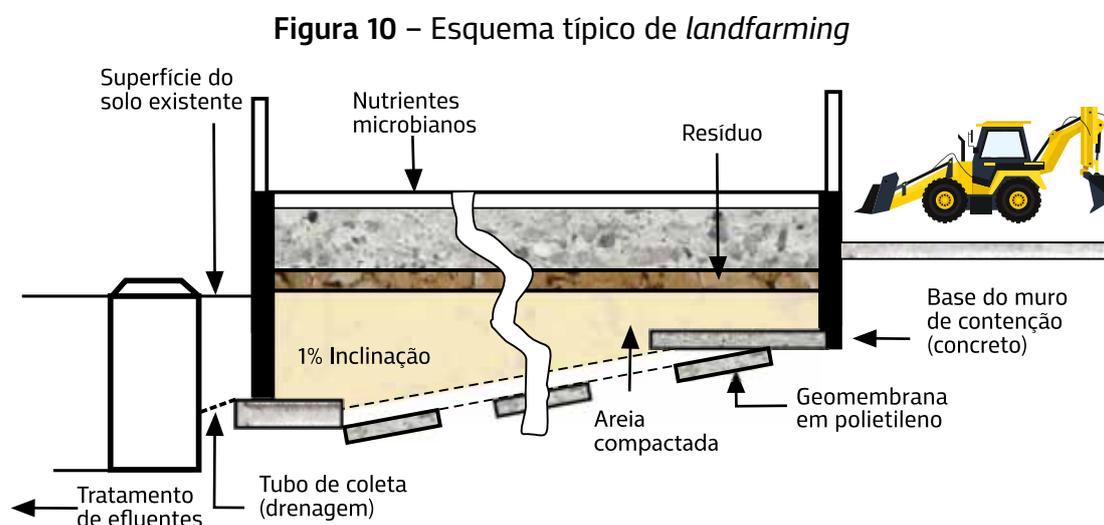
A seguir, serão indicadas as formas de tratamento biológico com potencial para tratamento de resíduos de perfuração.

1.2.3.1 Landfarming

De acordo com Jerônimo e Kitzinger (2014), a técnica do *landfarming* consiste no espalhamento do material oleoso sobre o solo preparado e a incorporação do óleo na camada arável até que a ação microbiana degrade os componentes presentes na borra (figuras 10 e 11). Esta técnica é apropriada para dispor óleo não passível de recuperação, como em materiais absorventes impregnados (palha, serragem e turfa) e as emulsões de água em óleo.

Esta tecnologia é aplicada em todo o mundo, incluindo áreas como o oeste do Texas, Venezuela, o oeste do Canadá e a Louisiana (CAPP, 2001). No Brasil, o *landfarming* já tem registro de uso desde 1982 para tratamento de resíduos oleosos, com a instalação de unidade na Refinaria Henrique Lage, na cidade de São José dos Campos, estado de São Paulo. Desde então, foram implantados *landfarming* em outras refinarias (CASTRO et al., 2005). No ano de 1984, a Central de Tratamento de Efluentes Líquidos (Cetrel), em Camaçari (BA), implantou duas unidades de *landfarming* em uma área de 20 hectares dedicada ao tratamento de resíduos gerados no Complexo Industrial de Camaçari (ALVES et al., 1996).

Todavia, apesar desse histórico de aplicação no tratamento de resíduos e derivados petroquímicos no Brasil, não foi identificada a utilização dessa técnica especificamente para tratamento de fluidos e cascalho de perfuração.



Fonte: Jerônimo e Kitzinger, 2014.

Ressalta-se que a preparação do solo inclui a sua impermeabilização. Importante ainda destacar que, diferentemente da disposição em aterro sanitário, essa técnica exige o manejo da mistura, incluindo sua uniformização, com o auxílio do controle da umidade, pH e nutrientes no solo até que o processo de degradação finalize e o resíduo esteja estabilizado.

Estruturalmente, a técnica é realizada em células operadas em ciclos regenerativos do solo com duração de 1 ano. Ao final do último ciclo de degradação, será realizado o plantio de cobertura vegetal para evitar a erosão do solo (OLIVEIRA, 2004).

Dentre os fatores limitantes destaca-se a chuva, período no qual não se adicionam resíduos nas áreas de *landfarming* descobertas, pois o excesso de umidade gera anaerobiose e, conseqüentemente, redução na velocidade de degradação do material oleoso. Sendo assim, de acordo com Jerônimo e Kitzinger (2014), a tendência é que os órgãos ambientais licenciem apenas áreas cobertas.

Além disso, a biodegradação de resíduos de hidrocarbonetos depende da estrutura química do composto, da quantidade e frequência da disposição do resíduo no solo, e das características físicas, químicas e biológicas do solo e requer ampla capacidade metabólica, dependendo, portanto, da composição da comunidade microbiana e de sua adaptação aos hidrocarbonetos presentes no resíduo.

Figura 11 – Áreas típicas utilizadas para *landfarming*



Fonte: Jerônimo e Kitzinger, 2014.

Para melhor desempenho no *landfarming*, deverá ser avaliada a toxicidade e também o nível de metais presentes nos resíduos a serem tratados, considerando-se que os metais não são decompostos pelos microrganismos durante o processamento do óleo, permanecendo no resíduo como um passivo. Por esta razão, as células de biodegradação recebem uma camada compactada de argila para evitar a lixiviação de metais e compostos orgânicos poluentes para as águas subterrâneas, um sistema de drenagem e uma camada reativa de solo preparada para receber o resíduo.

Ainda de acordo com Jerônimo e Kitzinger (2014), o *landfarming* é um sistema frequentemente escolhido para tratamento das borras oleosas de petróleo por ser de custo baixo para tratamento de grandes volumes de resíduos e possuir alto potencial de sucesso. Contudo, nem sempre o dimensionamento é feito de uma forma correta, ou adota aspectos técnicos como a separação das borras por peso molecular e efeitos cinéticos das reações de degradação. Logo, para a utilização do sistema *landfarming*, quase sempre se tem o emprego de grandes áreas e de elevados fatores de segurança para compensar a ausência dos critérios de dimensionamento.

A norma ABNT NBR ISO 13.894 (Tratamento no solo – *landfarming*) estabelece que o projeto, construção, operação e manutenção da unidade devem ser realizados de forma a elevar ao máximo a degradação, a transformação e/ou imobilização de contaminantes da camada reativa do solo. Esta norma preconiza, ainda, alguns requisitos relativos à topografia, solos e geologia, recursos hídricos, vegetação, vias de acesso, procurando manter longa distância de fontes de abastecimento de água potável, utilização de áreas onde o solo não é permeável, distância de núcleos populacionais, entre outros aspectos. Portanto, todo um preparo da área é exigido, a fim de que se reduzam, ao máximo, os riscos de contaminação de lençóis freáticos por lixiviação de poluentes.

Cabe destacar a existência de restrições quanto à utilização deste método.

Não há áreas especificamente licenciadas para *landfarming*. A alternativa seria a utilização de aterros classe I, de disponibilidade limitada e alto custo associado (aproximadamente R\$ 650/tonelada) para destinação final.

Devido à existência de passivos ambientais, as áreas utilizadas para depósito de resíduos de perfuração no Nordeste ("piscinas"), este método poderá encontrar barreiras no licenciamento ambiental.

1.2.3.2 Compostagem

Segundo o IBP (2014), a compostagem é o processo de decomposição biológica da fração orgânica biodegradável dos resíduos, efetuado por uma população diversificada de organismos, em condições controladas (como aeração, umidade, temperatura, relação carbono/nitrogênio e tamanho das partículas).

Embora não tenha sido evidenciada a aplicação no Brasil, a compostagem é utilizada como tratamento de resíduos de perfuração em diversos países como Reino Unido, Indonésia, África (Nigéria), Rússia, Canadá, Austrália e Estados Unidos (CAPP, 2001).

O processo de compostagem pode ser demorado e requer instalações relativamente grandes, mas pode ser adequado para ambientes remotos em que outras infraestruturas de tratamento não estão disponíveis (IOGP, 2016).

Nesse processo, os compostos são dispostos em pilhas ou leiras onde ocorre primeiramente a fase de degradação ativa e depois a maturação.

A primeira fase ocorre em temperaturas na faixa de 450° a 650°C, na presença de microrganismos termófilos e com duração entre 60 e 75 dias. Já na maturação, ocorre a umidificação da matéria orgânica em temperatura menor do que 450°C, durando cerca de 40 dias.

Segundo a IOGP (2016) e Ahammad Sharif et al. (2017), a compostagem de cascalho de perfuração requer a mistura com materiais orgânicos (serragem, lascas de madeira, palha etc.) para garantir as proporções apropriadas de carbono, nitrogênio e umidade e para fornecer maior porosidade e potencial de aeração para degradação biológica. A composição do fluido de perfuração tem um efeito significativo na composição do produto composto resultante e na velocidade da reação do processo de compostagem. Moléculas aromáticas e de cadeia ramificada costumam ser mais resistentes à biodegradação do que moléculas alifáticas e moléculas de cadeia linear de mesmo peso molecular e compostos de baixo peso molecular biodegradam mais rapidamente. Sal e metais pesados também podem ter impacto na qualidade do composto e sua adequação como fertilizante.

Ainda de acordo com a IOGP (2016), experimentos para a determinação do efeito do tipo de fluido base em taxas de compostagem sugerem que a parafina linear degrada mais rápido, seguida de alfa olefinas, óleo mineral melhorado de baixa toxicidade e, por fim, diesel. Alguns fornecedores de fluidos oferecem fluidos otimizados para subsequente biorremediação ou compostagem do cascalho.

A relação carbono:nitrogênio (C:N) é um parâmetro crítico, sendo recomendada uma relação por volta de 30:1 para uma boa compostagem. Outros parâmetros críticos são a umidade (sendo 50% ótima) e a relação de cascalho e matéria orgânica (relação 1:1 ótima).

Constitui uma destinação ambientalmente vantajosa, uma vez que é uma técnica de baixo custo, reduz a quantidade de resíduos enviados para aterros e produz um composto que pode ser utilizado como fertilizante orgânico na horticultura, floricultura, reflorestamentos e cultivos de mudas, recuperação de solos esgotados, cobertura de aterros, proteção de encostas e taludes e no controle de processos erosivos. No entanto, o composto produzido deverá respeitar critérios de composição estabelecidos pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento para que possa ser comercializado, pois uma das maiores preocupações de seus usuários é a presença de metais em concentrações que possam prejudicar as culturas e seus consumidores.

Comparada com o *landfarming* ou outras aplicações em terra, a compostagem é recomendada quando:

- » o espaço de terra é limitado;
- » a temporada de crescimento dos organismos (comunidade bacteriana, vermes etc.) é inferior a 4 meses;
- » o solo é pobre e não suporta vegetação;
- » grandes volumes de resíduos precisam ser tratados em um período relativamente curto de tempo;
- » a quantidade de sal nos resíduos é compatível com o tratamento em terra do composto;
- » a concentração de fluido retido no cascalho é alta (> 20%) e é requerido controle de voláteis.

Os processos de compostagem podem ser divididos em quatro grandes grupos.

- **Por sistemas de leiras revolvidas (*windrow*)**

Nessa técnica a mistura de resíduos é disposta em leiras (figura 12), sendo a aeração fornecida pelo revolvimento dos resíduos e pela convecção e difusão do ar na massa do composto (FERNANDES; SILVA, 1999).

A altura e seção das leiras dependem do resíduo estruturante e do método de construção da leira, sendo as mais comuns aquelas com 1,2 a 1,8m de altura e 2,0 a 4,5m de base (PEREIRA NETO, 1996).

Durante a compostagem, as pilhas devem ser revolvidas, no mínimo, três vezes por semana. Já na etapa de maturação, a necessidade de aeração é menor, podendo o revolvimento ser feito a cada 20-25 dias. Durante o planejamento do pátio, deverá ser previsto espaço necessário para circulação de caminhões, pás carregadeiras ou máquinas de revolvimento entre as pilhas. A utilização dessa técnica para tratamento de fluidos e cascalho de perfuração está associada à vermicompostagem, que será detalhada posteriormente.

Figura 12 – Ilustrações do sistema de leiras revolvidas



Fontes: a) Pires, 2011; e b) Mateus, 2017.

Figura 13 – Ilustrações do sistema de pilhas estáticas aeradas



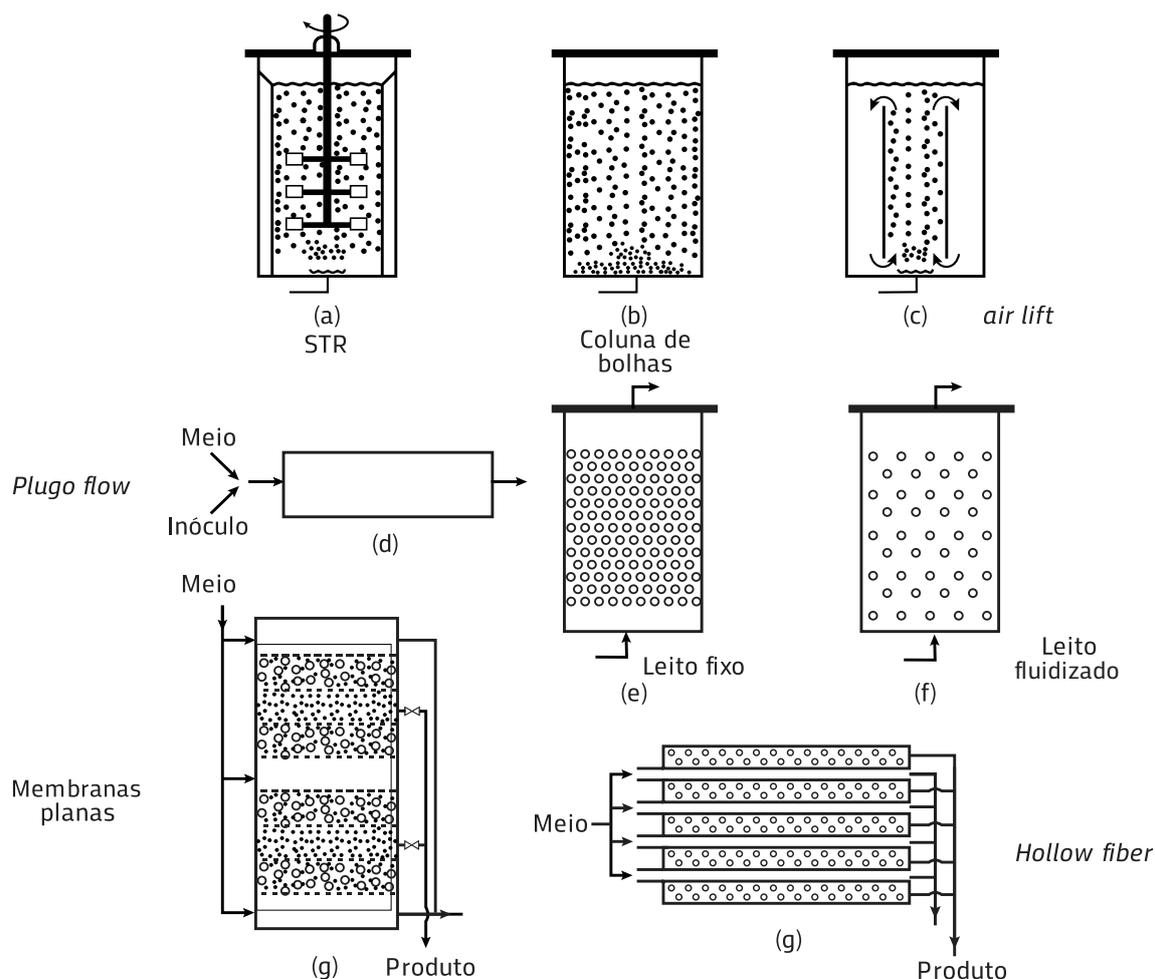
Fonte: Figueira Júnior, 2012.

- **Compostagem por sistemas fechados ou reatores biológicos**

Nesta alternativa, os resíduos são colocados dentro de sistemas fechados (tambor, trincheira revestida de concreto, ou elemento de contenção similar) que permitem o controle de parâmetros como temperatura, umidade e arejamento. O aparelho geralmente tem um mecanismo para girar ou agitar o material para uma aeração adequada, garantindo assim uma melhor homogeneidade do meio em relação à temperatura (FERNANDES; SILVA, 1999).

O reator biológico, ou biorreator, é um reator no qual ocorre uma série de reações químicas catalisadas por biocatalisadores, que podem ser enzimas ou células vivas (microbianas, animais ou vegetais). Existe uma grande variedade de reatores biológicos e diversas classificações. Alguns exemplos podem ser observados na figura 14, como biorreatores agitados mecanicamente (STR ou STB), agitados pneumaticamente, biorreatores a membrana e biorreatores com células/enzimas imobilizadas (SCHMIDELL et al., 2001; PEREIRA; BON; FERRARA, 2008).

Figura 14 – Esquema de alguns tipos de biorreatores



Fonte: Klasener, 2019.

O biorreator agitado mecanicamente *stirred tank bioreactor* (STB) ou *stirred tank reactor* (STR) é o tipo de reator mais estudado e utilizado industrialmente, constituindo cerca de 90% dos reatores industriais (SCHMIDELL et al., 2001). Suas principais vantagens são a versatilidade e fornece bons resultados para uma grande gama de bioprocessos. Por outro lado, apresenta certas desvantagens como demanda de grande aporte de energia para a agitação mecânica e difícil escalonamento (PEREIRA; BON; FERRARA, 2008).

Já os biorreatores agitados pneumaticamente podem ser do tipo *airlift* ou coluna de bolhas (*bubble column*). Possuem uma elevada relação altura/diâmetro e possibilitam a operação contínua de bioprocessos com altas densidades celulares (células imobilizadas ou floculantes).

Os resíduos são colocados dentro de sistemas fechados, que permitem o controle de todos os parâmetros do processo de compostagem.

- **Vermicompostagem**

A vermicompostagem é um processo biológico aplicado ao tratamento de resíduos industriais, orgânicos, agrícolas e urbanos, cuja técnica de decomposição consiste na bio-oxidação e estabilização da matéria orgânica resultante da ação combinada de minhocas (revolvimento do composto e trituração) e da microflora que vive em seu trato digestivo (NUNES et al., 2016).

Nesse tipo de tratamento, o cascalho de perfuração é convertido em fertilizante orgânico. O processo, desenvolvido por pesquisadores da Nova Zelândia (GETLIFF et al., 2002), foi testado e comprovado com sucesso no tratamento de determinados resíduos de base sintética. Para o teste, o cascalho contaminado foi misturado com serragem, grama não digerida e água e o composto aplicado como matéria-prima em leiras (*windrows*) para consumo das minhocas (ARGONNE NATIONAL LABORATORY, 2008; AHAMMAD et al., 2017).

Sistemas de irrigação controlados foram utilizados para corrigir a umidade durante períodos de baixa pluviosidade e as leiras foram cobertas para proteger as minhocas da luminosidade. O material misturado foi aplicado no centro/topo das leiras, geralmente uma vez por semana, a uma profundidade média de 15-30mm (ARGONNE NATIONAL LABORATORY, 2008; AHAMMAD et al., 2017).

A partir dos experimentos, foi identificado que as minhocas atuam no topo de cada leira, consumindo o material aplicado por um período de 5 a 7 dias e, posteriormente, o fertilizante orgânico resultante pode ser coletado e embalado para distribuição e uso (ARGONNE NATIONAL LABORATORY, 2008; AHAMMAD et al., 2017).

Contudo, este método não parece ter sido comercializado em larga escala: uma dificuldade significativa é a necessidade de manutenção ao longo do tempo das colônias de minhocas (figura 15) que são necessárias para o processo de compostagem, particularmente quando o fornecimento de cascalho pode ser irregular ou limitado a um período curto de tempo (IOGP, 2016).

No Brasil, Primaz et al. (2017) realizaram teste comparativo entre compostagem e vermicompostagem em solo contaminado com óleo lubrificante usado e concluíram que os dois processos foram eficazes para a degradação dos HPAs em 60 dias, afirmando que esses procedimentos podem ser usados para revitalização do solo contaminado. Dessa forma, pode-se supor que este tratamento também será eficaz para parafinas e olefinas leves presentes na composição dos FPBNAs.

Outro teste comparativo foi realizado por Peruzzo et al. (2018), utilizando solo contaminado com biodiesel. A conclusão indica que o vermicomposto se mostrou viável para um possível tratamento de área contaminada por biodiesel, uma vez que na amostra de solo com 10% de contaminação, em 45 dias ocorreu a degradação de 96% da contaminação por biodiesel.

Não foi identificada utilização dessa técnica pela indústria de óleo e gás no Brasil.

Figura 15 – Vermicompostagem



Fonte: Lourenço, 2012.

1.2.4 Recondicionamento

De acordo com o IBP (2014), o recondicionamento está relacionado à operação exercida sobre um produto usado ou parte remanescente do produto deteriorado ou inutilizado que o renova ou restaura para que ele possa ser novamente utilizado como produto.

Em face à impossibilidade do seu descarte no mar e, levando-se em consideração as boas práticas da indústria de óleo e gás, os FPBNAs são reaproveitados de um poço para o outro ou de um projeto para o outro. Sendo assim, ao fim de cada poço/fase, quando o FPBNA não for mais utilizado, pode ser feito o recondicionamento a bordo da unidade de perfuração ou a transferência deste para a planta de fluidos onde todas as suas propriedades físico-químicas de interesse serão medidas e, a partir dos resultados, será devidamente tratado para obtenção das especificações para o projeto do novo poço (IOGP, 2016).

De acordo com Thomas (2001), o recondicionamento consiste na eliminação de sólidos ou gás que se incorporaram ao fluido durante a perfuração. Quando necessário, ainda é realizada a adição de base orgânica, tratamento com aditivos químicos para ajuste de suas propriedades (viscosidade e densidade, ajuste da razão óleo e água e estabilidade elétrica etc.) e, quando aplicáveis, tratamentos físicos para redução do peso do fluido e do teor de sólidos, permitindo assim sua reutilização.

Este tratamento permite, além do maior grau de reutilização dos fluidos, a redução dos volumes de resíduos em decorrência da diminuição de fluido a ser fabricado. Tal redução favorece o uso de tecnologias mais adequadas, ou mesmo mais acessíveis, para tratamento e destinação final.

De maneira geral, as características e a composição dos fluidos serão monitoradas pelos seguintes procedimentos: controle de pH, estabilidade elétrica, densidade, viscosidade etc. e a realização de testes, tais como: *reverse phase extraction test* (RPE) – teste de extração de fase reversa e cromatografia gasosa e espectrofotometria de massa (CG/MS), registro de concentrações dos produtos (CP) que compõem o fluido e que serão atualizados previamente a cada transferência entre a plataforma e a embarcação de apoio e a planta de tratamento de fluidos, ou sempre que for necessário ajuste na concentração dos produtos e, ainda, pela realização de inspeções para garantir que os tanques de armazenamento utilizados estejam vazios e limpos.

O transporte de fluido sintético será devidamente monitorado, sendo utilizado sistema de manifesto de transporte marítimo (MTM) e manifesto de transporte terrestre (MR), nos quais constarão informações sobre o local de geração, tipo de fluido, quantidade, data, barco transportador e assinaturas dos responsáveis na unidade de perfuração, na embarcação de apoio e na base de apoio.

Toda a documentação emitida será conferida e assinada na chegada do fluido na base de apoio e/ou planta de tratamento de fluido, de forma a garantir o seu rastreamento.

1.2.5 Dewatering

Dewatering é um processo utilizado para tratamento de fluidos de perfuração de base aquosa, majoritariamente em ambiente *onshore*, onde há escassez de água e/ou quando é necessário perfurar com fluido de baixa densidade (MOHAMMADI et al., 2006) e aplicado em vários países como Argentina, Bolívia, Brunei, Estados Unidos, Rússia e Venezuela (HALLIBURTON, 2014).

O processo usa uma combinação de tratamento químico e centrifugação para remover partículas de tamanho coloidal, que se acumulam em grandes quantidades no FPBA durante a perfuração e para remoção de polímeros.

As partículas coloidais são ultrafinas, geralmente menores que 3 microns de tamanho. Elas são estáveis e uniformemente dispersadas no fluido de perfuração. Em solução, elas normalmente possuem uma carga eletrostática negativa e essa natureza iônica lhes confere estabilidade e as mantém suspensas, e mesmo com a aplicação das altas forças G da centrífuga, não se consegue removê-las do fluido, ou seja, processos mecânicos tais como peneiras, *mud cleaners* e centrífugas são ineficazes.

Para superar esse problema, usam-se produtos químicos para desestabilizar as partículas e fazer com que se agreguem em unidades maiores chamadas flóculos, que são mais fáceis de ser removidas por centrifugação. Uma flocculação de sucesso pode envolver até quatro passos no processo de *dewatering*, conforme descrito a seguir:

- » ajuste de pH – a maioria dos fluidos de perfuração é mantida em condições alcalinas, com pH entre 9,0 e 10,5. Alguns coagulantes funcionam melhor em um pH mais neutro, em torno de 7,0, então é feita a adição de um ácido à alimentação de fluido para ajustar o pH ao ponto ótimo do coagulante;
- » coagulação – polímeros catiônicos positivamente carregados e sais inorgânicos como sulfato de alumínio formam os dois tipos principais de coagulantes. Estes são usados para reduzir a carga eletrostática das partículas e permitir que elas se juntem quando entram em contato entre si. Em

grandes concentrações, os sais inorgânicos podem formar grandes precipitados chamados *sweep flocs* que também envolvem as partículas coloidais;

- » flocculação – o próximo passo no processo envolve a adição de um polímero flocculante especial ao fluido coagulado. O polímero forma “pontes” entre as partículas coaguladas permitindo que elas se agrupem em estruturas maiores e porosas chamadas de flóculos. Comparadas às partículas coloidais iniciais, estes flóculos maiores são relativamente fáceis de remover como uma borra úmida;
- » centrifugação – o passo final no processo de *dewatering* é a remoção dos sólidos flocculados usando uma centrífuga de alta velocidade para obter um fluido recuperado útil, sem partículas sólidas.

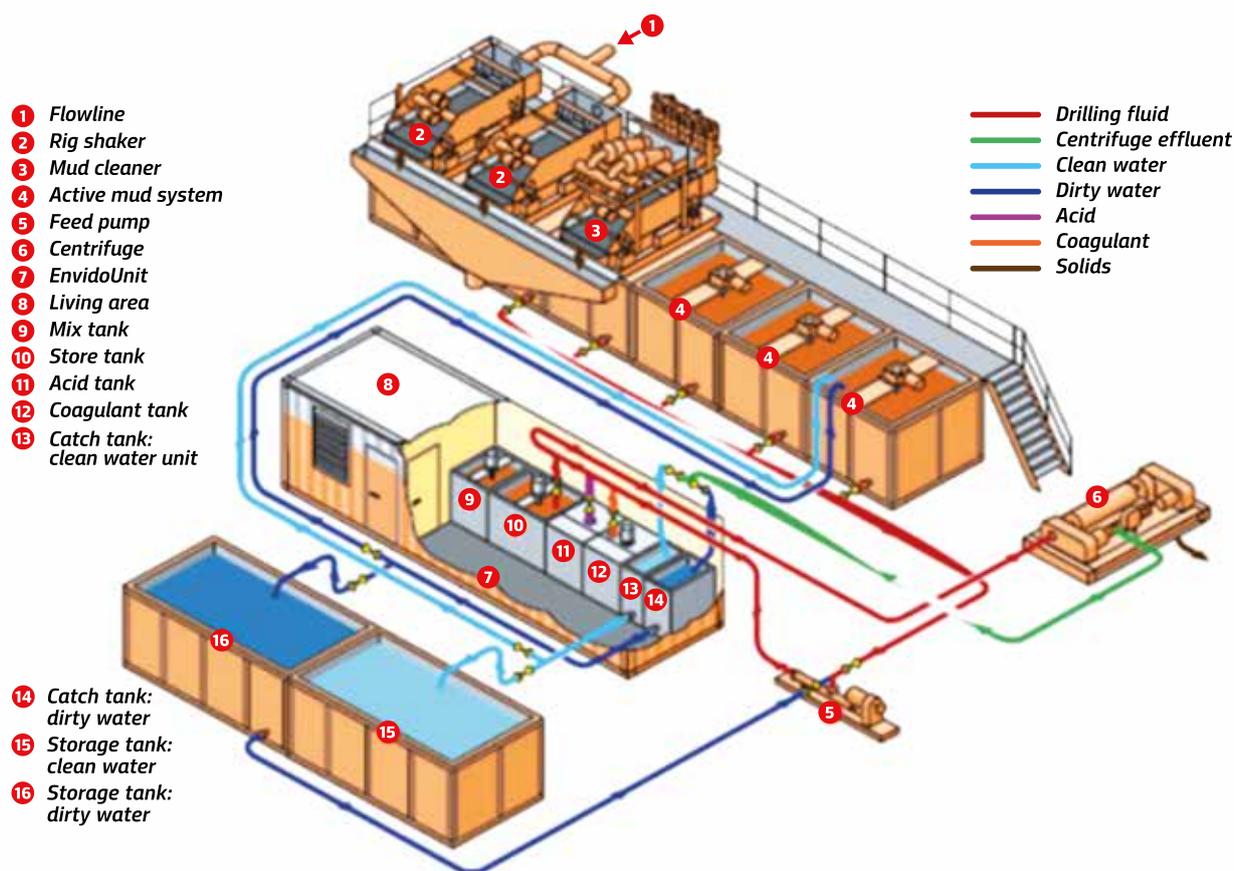
Durante o processo, o fluido do sistema ativo ou tanques de armazenamento é transferido para a unidade de *dewatering*. Caso ele seja densificado, deve ser alimentado em uma centrífuga de recuperação de barita a fim de remover os sólidos de alta densidade para retorno ao sistema ativo.

Conforme o fluido passa pelo *loop* da unidade de *dewatering*, é tratado para permitir a flocculação. O tratamento químico depende do tipo de fluido sendo tratado e a qualidade requerida do fluido recuperado – pode ser desejável a retirada apenas de sólidos finos para reúso do fluido, ou o processo pode ser projetado para recuperação de água com remoção de sólidos e polímeros do fluido. Isto pode incluir tratamento com ácido a fim de produzir o pH desejado, e a adição de coagulantes e flocculantes. Cada tratamento requer capacidades de estocagem separadas e bombas de injeção, bem como agitadores. Com produtos secos, são necessários tanques adicionais para mistura. O processo de mistura e injeção é totalmente controlado. Os coagulantes precisam de um misturador de alto cisalhamento para garantir a dispersão na alimentação do fluido, enquanto os polímeros flocculantes requerem uma ação de baixo cisalhamento para prevenir que os flóculos se desfaçam.

O fluido flocculado é alimentado à centrífuga de *dewatering*, onde os flóculos são removidos no descarte sólido para gerar um fluido recuperado limpo para reúso ou água para descarte. Cabe destacar que o processo não removerá sais ou outros aditivos na solução, como cloreto de potássio (KCl) ou cloreto de sódio (NaCl).

A seguir é apresentado um modelo de *layout* de uma planta de tratamento *onshore* (figura 16).

Figura 16 – Modelo de *layout* de planta de *dewatering*



Fonte: M-I Swaco, 2016.

Considerando-se que há um processo para extrair os sólidos (ex.: decantação) e destiná-los da forma devida, a destinação do fluido resultante pode seguir dois caminhos:

- » diluição numa ETE de grande capacidade, de forma que o DQO possa ser enquadrado para descarte e o cloreto não tenha impacto no processo biológico;
- » tratamento em ETEs mais avançadas, baseadas em processos físicos de eletrofloculação, ultrafiltração ou termocompressão a vácuo, aliadas a processos químicos o que resultaria em uma solução de elevado custo.

Os principais benefícios do *dewatering* são: (i) evitar a necessidade de tratamento do fluido por diluição; (ii) diminuição da quantidade de resíduo gerado; (iii) recuperação de água, que pode ser utilizada na fabricação de fluido ou descartada.

A utilização dessa técnica não é aplicável em ambiente *offshore* tendo em vista a limitação de espaço em uma plataforma para instalação de uma ETE de grande porte e/ou a ausência de uma solução tecnológica adequada.

1.3 Alternativas de reutilização e aproveitamento energético

Neste item são abordadas técnicas bastante diferenciadas, que envolvem desde a simples disposição (caverna de sal ou aterro), o reaproveitamento dos resíduos de perfuração (utilização na construção civil, agregação em artefatos cerâmicos, agregação em artefatos de cimento e pavimentação de vias) até a sua utilização para geração de energia (coprocessamento e *waste to energy*).

1.3.1 Reutilização

A reutilização é o processo de aproveitamento dos resíduos sólidos sem sua transformação biológica, física ou físico-químicas, observadas as condições e padrões estabelecidos pelos órgãos competentes do Sisnama e, se couber, do SNVS e do Suasa (IBP, 2014). Segundo a PNRS, o lixo pode ser reutilizado usando tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental e com a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental.

Ressalta-se que, de acordo com as características do cascalho, não seria possível sua reutilização sem tratamento prévio.

Diferentemente da reutilização, a reciclagem é um processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes do Sisnama e, se couber, do SNVS e do Suasa (IBP, 2014).

Nesse sentido, os tratamentos visando à reciclagem podem ser aplicados tanto ao cascalho quanto aos FPBNAs. Ressalta-se que os FPBAs não são passíveis de reciclagem.

Para o cascalho, o objetivo é a recuperação de fluido aderido e a remoção de contaminantes, permitindo assim uma destinação mais adequada ou com menores custos, por exemplo: agregação em artefatos cerâmicos; agregação em artefatos de cimento e pavimentação de via.

Já para o FPBNA, a reciclagem permite a separação dos óleos presentes no fluido, podendo estes ser enviados para rerrefino ou mesmo coprocessados, por exemplo.

1.3.1.1 Utilização na construção civil

Após tratamento, o cascalho proveniente de perfuração *offshore* pode ser utilizado em uma grande variedade de propósitos relacionados com a construção civil, incluindo: material de preenchimento; material rodoviário; material de cobertura diária em aterros industriais; agregado na fabricação de concreto, tijolo ou bloco.

Esta é uma técnica pouco difundida, tendo sido evidenciada apenas a realização de teste de aplicação em Taiwan, Mar do Norte e Nigéria, portanto é necessário o estudo do potencial de aplicação em escala comercial para atendimento à indústria de óleo e gás no Brasil.

Esta aplicação está intimamente ligada às técnicas de solidificação e estabilização anteriormente descritas, uma vez que o cascalho geralmente necessita de estabilização antes de ser utilizado.

A indústria da construção civil demanda grandes volumes de materiais e, dessa forma, possui um grande potencial para a utilização de resíduos que podem ser incorporados em alguns processos construtivos em substituição a materiais. Tal incorporação reduz a pressão sobre as jazidas de matéria-prima e promovem a redução, reutilização e/ou reciclagem de resíduos.

Destaca-se que a maior parte dos ensaios de incorporação de cascalho de perfuração em concretos tem por finalidade encapsular os resíduos com o auxílio de matrizes cimentantes e não fabricar produtos

de construção de base cimentícia (AL-ANSARY; AL-TABBAA, 2007; LEONARD; STEGEMANN, 2010; OPETE et al., 2010).

A principal desvantagem apontada é a alta concentração de componentes orgânicos, cloretos e bentonita, que dificulta o processo de hidratação do cimento e pode diminuir a resistência à compressão do concreto. Além disso, a alta concentração de cloretos impede a utilização em concreto estrutural, pois pode provocar uma deterioração rápida da estrutura (AL-ANSARY; AL-TABBAA, 2007).

1.3.1.2 Agregação em artefatos cerâmicos

A incorporação de resíduos industriais em cerâmica vermelha, com a simples mistura, vem sendo muito utilizada atualmente na busca por matérias-primas alternativas e por uma destinação ambientalmente correta aos resíduos (BABISK et. al., 2012 apud BARROS, 2015).

Com relação ao uso dessa técnica no Brasil, tanto na Bahia quanto no Rio de Janeiro, há cerâmicas licenciadas para recebimento de resíduos classe I, incluindo resíduos de perfuração.

Em pesquisa realizada por Pires (2009), o autor conclui que

a incorporação de cascalho de perfuração na produção de cerâmica vermelha apresentou-se como uma alternativa economicamente viável e tecnicamente segura para o tratamento e destinação final deste resíduo. Uma vez que o processo de queima, inerente à produção de peças cerâmicas, encapsula e reduz a baixos teores os constituintes perigosos do cascalho de perfuração.

Os resultados obtidos pelos autores serviram de subsídio para a concessão de licença ambiental para utilização da técnica desenvolvida na remediação de cascalho de perfuração no estado da Bahia.

Apesar de, em um primeiro momento, a alternativa de simplesmente se agregar os resíduos de perfuração (fluido ou cascalho) *in natura* na fabricação de tijolos, telhas e outros artefatos se mostre ambientalmente favorável, é importante ressaltar que algumas questões se apresentam como barreiras para essa destinação, sendo:

- » dificuldade de atendimento, pelas fábricas de artefatos cerâmicos, das melhores práticas de qualidade, segurança, meio ambiente e saúde (QSMS) praticadas pela indústria de O&G, e exigida de seus fornecedores;
- » risco de contaminação do solo, visto que processo de mistura pode ocorrer diretamente sobre a lavra de argila;
- » reduzido controle de emissão atmosférica e/ou ausência de lavador de gases, o que pode acarretar a emissão de hidrocarboneto durante a queima do artefato cerâmico;
- » baixo controle em relação à origem da madeira utilizada nos fornos de queima.

Dessa forma, faz-se necessária uma rigorosa análise para verificar os procedimentos de QSMS que deverão ser adotados, de modo a reduzir as questões legais relacionadas à responsabilidade solidária.

1.3.1.3 Agregação em artefatos de cimento

Com o resíduo sólido inerte e livre de óleo, existe a possibilidade de outros tipos de reaproveitamento, como a agregação em artefatos de cimento. Neste processo, o cascalho seco entra como substituição ao elemento sólido do traço, em geral, pedra britada ou mesmo areia, conforme apresentado por Fialho

et al. (2012a). Após a mistura, a massa poderá ter diversos usos, como produção de blocos e pisos intertravados.

Não há informações de aplicação em nível mundial para aproveitamento de resíduos de perfuração. No Brasil se tem registro do estudo conduzido por Neto (2017) relativo à adição de cascalho tratado na pasta de cimento utilizada na cimentação de poços *onshore*. Os resultados do estudo indicam que a adição de 10% de cascalho em pastas de cimento de produção representa uma vantagem econômica possibilitando um aumento de 8% no rendimento da pasta de cimento.

1.3.1.4 Pavimentação de vias

Diferentes pesquisas apontam a possibilidade da incorporação de cascalho de perfuração como material alternativo na produção de massa asfáltica e na pavimentação, especialmente por estabilização dos resíduos oleosos com material argiloso (ALMEIDA, 2016).

No entanto, a presença de cloretos e sulfatos pode impor restrições a essa forma de destinação. A realização de testes de lixiviação e solubilização, poderá indicar a necessidade de remoção dos óleos e sais.

Com relação à experiência dessa prática no mundo, há registros da incorporação de cascalho de perfuração para construção de estradas na Venezuela (HALLIBURTON, 2007) e no Texas e Colorado, EUA (BURNETT; PLATT, 2014; HUME, 2015).

Cabe destacar que, até o momento, não existe uma experiência internacional consolidada para esse tipo de disposição como revestimento primário ou camadas de sub-base compactadas em estradas. Portanto, essa alternativa de disposição ainda tem sido objeto de pesquisa, ensaios laboratoriais para estudo de propriedades do concreto contendo cascalho como agregado e, também, experiências de campo em trechos de rodovias vicinais, especialmente construídas para observação e avaliação de desempenho.

1.3.2 Aproveitamento energético

O aproveitamento energético consiste na utilização do cascalho com fluido aderido e borras oleosas para geração de energia. As alternativas consistem em coprocessamento de resíduos e *waste to energy*.

1.3.2.1 Coprocessamento de resíduos

O coprocessamento é uma técnica de utilização de resíduos sólidos industriais como substitutos parciais de matéria-prima e/ou de combustível no sistema de forno de produção de clínquer da fabricação de cimento (IBP, 2014). Essa técnica é amplamente utilizada para resíduos perigosos provenientes de diversos processos industriais na Europa, Estados Unidos e Japão (FIN et al., 2018). No Brasil existem 36 plantas, com um ou mais fornos licenciados para o coprocessamento de resíduos, sendo sua maior concentração no sudeste do país (Minas Gerais).

Os fornos de clínquer são licenciados para produzir cimento, porém, quando se candidatam ao coprocessamento de resíduos, o entendimento dos órgãos ambientais é de que pretendem assumir uma atividade adicional, sendo assim precisam atender a limites de emissão de material particulado, bem como apresentar resultados de testes de queima (CARVALHO, 2012).

A conexão entre os geradores de resíduos e as fábricas de cimento é feita, em geral, por empresas de gerenciamento de resíduos, que devem possuir licença ambiental para as operações de manuseio, pré-tratamento e transporte dos mesmos. Essas empresas são responsáveis pelo fornecimento, instalações de recebimento e armazenagem e injeção do resíduo no forno.

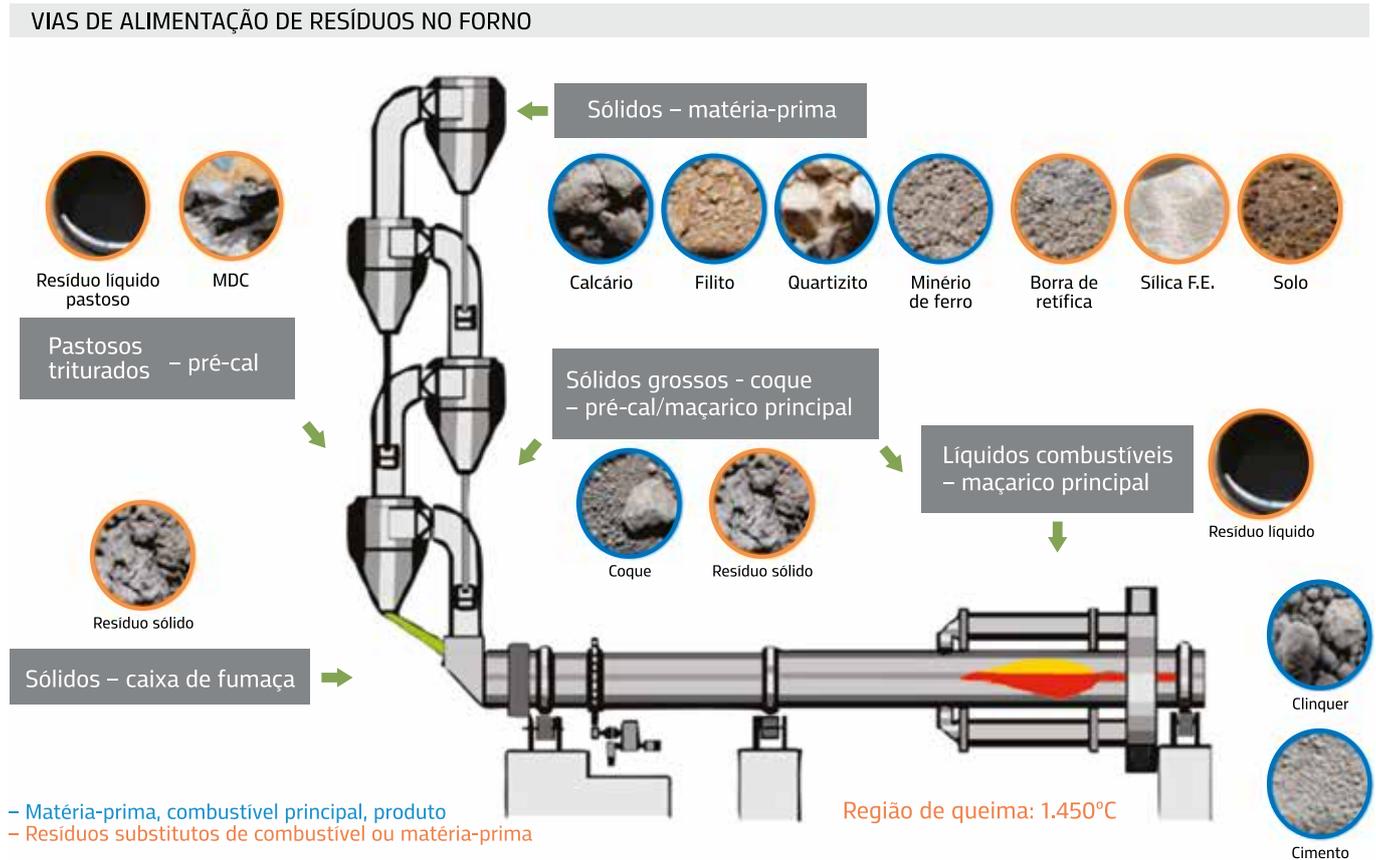
A atividade de coprocessamento (figuras 17 e 18) é regulamentada pela Resolução Conama nº 264/99. Ela trata do licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de coprocessamento de resíduos e pela Resolução Conama nº 316/02 que aborda o Sistema de tratamento térmico – dioxinas e furanos, existindo, ainda, legislações estaduais da Cetesb (SP), Fundação Estadual do Meio Ambiente (Feam, MG), Fundação Estadual de Proteção Ambiental (Fepam, RS) e Instituto Ambiental do Paraná (IAP, PR).

Segundo Mendes e Sousa (2013), o reaproveitamento do cascalho de perfuração na fabricação de cimento Portland por meio do seu coprocessamento consiste em uma atividade que visa à reutilização de materiais considerados indesejáveis por sua fonte geradora, como alternativa para substituição de matéria-prima para a produção de cimento. Neste caso, o cascalho de perfuração entraria no coprocessamento adicionado ao calcário (matéria-prima básica para fabricação do cimento), uma vez que o resíduo não possui poder calorífico para ser substituto de combustíveis, além de apresentar características físico-químicas semelhantes às do calcário obtido a partir de minerais e outros materiais ricos nestes componentes, como a argila e o minério de ferro.

A fim de garantir o atendimento às características físico-químicas do processo e às especificações estabelecidas pela licença ambiental de queima da fábrica de cimento, são analisadas características e propriedades dos resíduos, tais como: poder calorífico, umidade, viscosidade, materiais voláteis, ponto de fulgor, teores de cinzas, metais pesados, enxofre e sólidos em suspensão. Em função dos resultados das análises, os resíduos podem ser rejeitados, fornecidos em seu estado natural, ou passar por um pré-tratamento físico-químico, como por exemplo destilação, fracionamento, filtração, trituração, moagem, maceração. Neste caso, são geralmente misturados a outros resíduos de diversas procedências para formar o chamado *blend*. Dessa forma, na unidade de *blending* ou blendagem é mantido controle analítico de todas as remessas de resíduos para verificar sua adequação às especificações antes de serem utilizados para coprocessamento (CARVALHO, 2012; MENESES; PAULA, 2014). No Brasil, as empresas de blendagem de resíduos de perfuração estão alocadas no Maranhão, Sergipe, Bahia, Ceará, Rio de Janeiro, Pará e Santa Catarina.

Cabe destacar que empresas de blendagem fornecem certificados de destinação final (CDFs) especificando multitecnologias no método de destinação, que podem incluir coprocessamento ou não. Já no coprocessamento é fornecido o certificado de destruição térmica, reduzindo assim as chances de materialidade em contenciosos e passivos futuros.

Figura 17 – Esquema do coprocessamento



Fonte: Revalore, 2019.

Figura 18 – Exemplo de unidade de coprocessamento



Fonte: Ferrari, 2014.

1.3.2.2 *Waste to energy (WTE)*

Segundo Sioen e Ribeiro (s.d.), existem dois métodos principais de conversão de lixo em energia: conversão térmica ou incineração (WTE) e digestão anaeróbica.

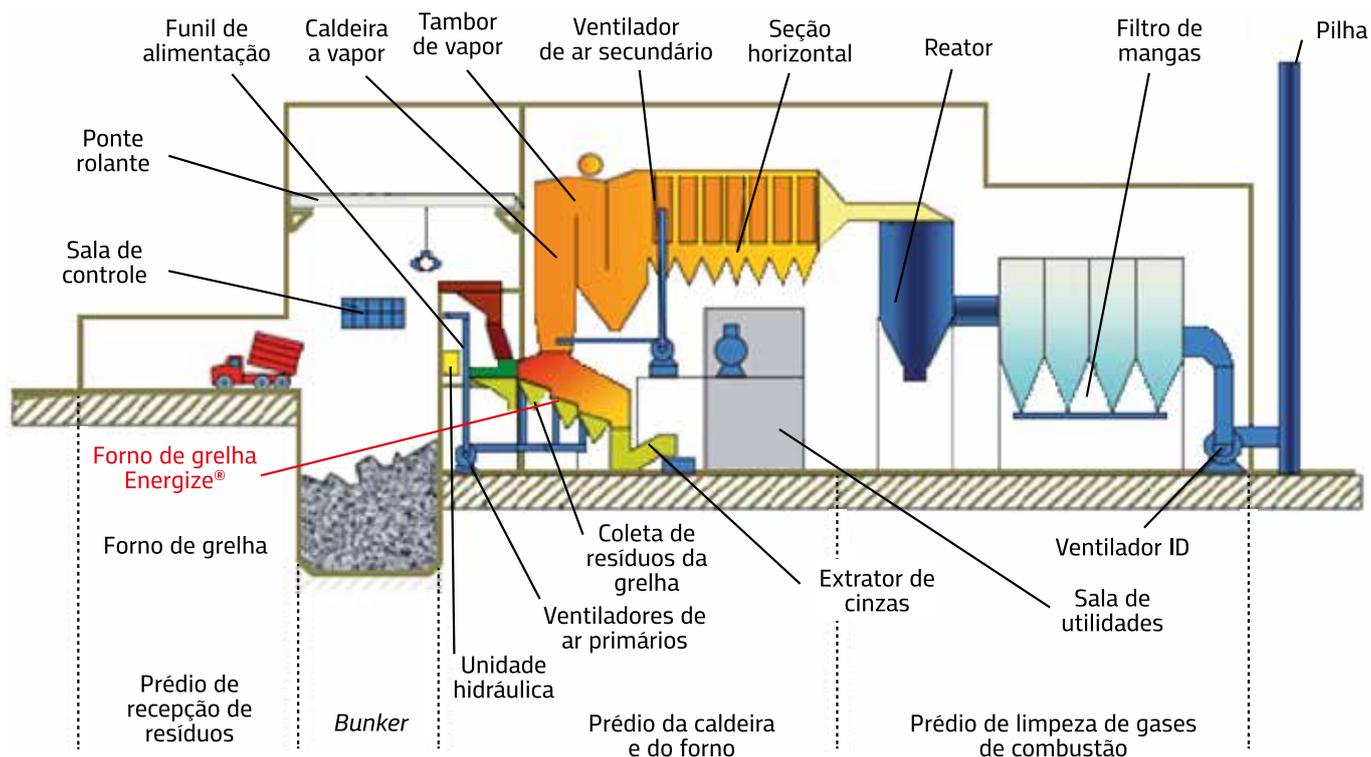
Waste to energy (WTE) são tecnologias de tratamento térmico com aproveitamento energético que vêm crescendo em diversos países da Europa do Norte, Japão, várias cidades dos EUA e na China (THEMELIS et al., 2013). No Brasil foi identificada a intenção de construção de plantas piloto em Bauru (SP).

O tratamento térmico associado a um sofisticado sistema de limpeza de gases da combustão satisfaz normas ambientais mais exigentes. Existem cerca de 650 dessas usinas em operação nos países desenvolvidos. As usinas WTE possuem custos de capital, de operação e de manutenção muito elevados, sendo difícil sua adoção em países em desenvolvimento (RIBEIRO, 2010).

Segundo Themelis et al. (2013), o método mais simples e comum de recuperação da energia de resíduos sólidos urbanos (RSU) é por combustão, sendo a maior parte das plantas de WTE construídas do tipo grelha de combustão. Outros tipos de tratamento térmico que existem são: a oxidação parcial e a formação de um gás sintético (gaseificação) e a pirólise – aquecimento do resíduo pós-reciclagem para convertê-lo em um óleo sintético.

No processo WTE de grelha de combustão, ilustrado na figura 19, os resíduos são despejados em um poço, a partir do qual são carregados até a calha de alimentação da fornalha. De lá são empurrados para a grelha móvel. Esta se movimenta, transportando os resíduos através da câmara de combustão, na qual são incinerados e reduzidos a cinzas. O ar é soprado pela grelha (de baixo para cima), levando os gases de combustão formados por um sistema de caldeira a vapor onde são resfriados. A energia dos resíduos é recuperada principalmente pelo calor dos gases de combustão (THEMELIS et al., 2013; SIOEN; RIBEIRO, s.d.).

Figura 19 – Esquema de usina lixo-energia padrão de incineração em grelha



Fonte: Modificado de Sioen; Ribeiro, s.d.

Segundo Themelis et al. (2013), o Earth Engineering Center da Universidade de Columbia examinou dados operacionais de mais de 200 plantas de grelha de combustão, obtendo resultados de toxicidade equivalente por metro cúbico padrão na ordem de 0,02 nanograma – o que corresponde a 0,1 grama de dioxinas tóxicas equivalentes emitidas por milhão de toneladas de RSU processado.

Segundo esses autores, existem sistemas modernos de pirólise e lavadores de gases para redução de emissões atmosféricas e tratamento de efluentes. Uma das principais vantagens seria o tratamento de múltiplas cadeias de resíduos sem grandes requerimentos em termos de qualidade da entrada, exceto a redução da umidade e a geração de significativa quantidade de energia. Contudo, a gestão dos resíduos perigosos ao final do processo é um problema e aumenta os custos operacionais. Mesmo a cinza de fundo da caldeira pode ser perigosa.

Ribeiro (2010) apresenta um novo sistema de geração de energia elétrica a partir de lixo, denominado ciclo combinado otimizado (CCO). Esse sistema constitui um processo híbrido, gás natural-lixo, sendo 75% da energia gerada pela queima de lixo e o restante pelo gás natural. No Brasil, a viabilização econômica do sistema é possível apenas com as receitas da venda da energia elétrica e com taxas para disposição final de lixo reduzidas. Existem sistemas similares em outros países, porém a quantidade de gás natural utilizada é elevada.

A usina com CCO, por sua vez, é uma usina convencional de tratamento térmico de resíduos com duas modificações: aumento da pressão do vapor e a introdução de um preaquecedor de ar resistente à corrosão (tubos de vidro ou teflon), após a caldeira. O preaquecedor aumenta a eficiência da usina e preaquece o ar de combustão, facilitando a queima.

A aplicação dessa metodologia no cenário brasileiro seria dificultada devido à baixa segregação de resíduos, visto que nos países da Europa é feita a etapa prévia de separação de resíduos secos e úmidos, evitando assim a redução de eficiência do processo.

Além disso, no caso específico dos resíduos de perfuração, seria indispensável a associação com outra técnica para separação das frações água, óleo e rocha, pois o cascalho possui baixo poder calorífico e o teor de umidade atrapalha o processo de queima. Nesse cenário, apenas o óleo recuperado após a etapa de dessorção térmica seria utilizado para queima na usina.

1.4 Alternativas de disposição final

As alternativas para disposição final dos resíduos de perfuração são: disposição em cavernas de sal e em aterro industrial classes I e II como veremos a seguir.

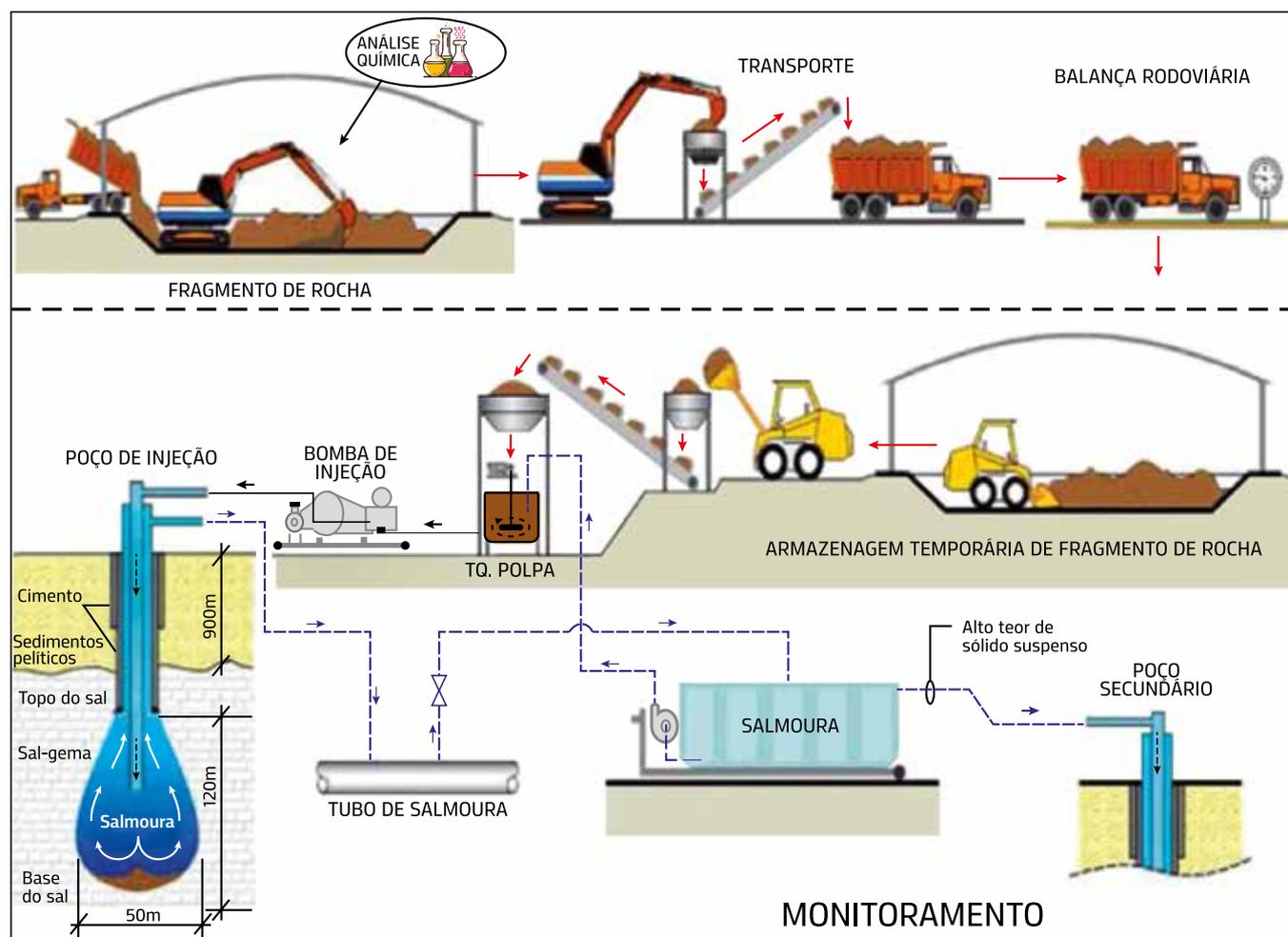
1.4.1 Disposição em cavernas de sal

A utilização de cavidades subterrâneas abertas por dissolução em maciços evaporíticos para armazenamento seguro de produtos e rejeitos industriais é uma prática amplamente adotada em países como Estados Unidos (Texas e Louisiana), Canadá e México, onde os padrões de controle ambiental estão entre os mais rigorosos do mundo (GANGHIS et al., 2009). Contudo, não se tem registro de aplicação no Brasil.

De forma geral, os resíduos são trazidos para a locação da caverna em caminhões e descarregados em tanques onde são misturados com água ou salmoura para fazer uma suspensão. O cascalho é então bombeado pela tubulação instalada no poço de injeção (perfurado e instalado para este fim). Ao final do processo, a solução de salmoura saturada retornará à superfície pelo espaço anular existente entre a tubulação e as paredes do poço, permanecendo a fase sólida, depositada na base da cavidade subterrânea (PAULA, 2014).

A figura 20 apresenta um diagrama esquemático da injeção do cascalho em cavidades subterrâneas em mina de sal-gema e a figura 21 apresenta detalhe dos fluxos de resíduos, salmoura e sólidos em uma caverna.

Figura 20 – Diagrama esquemático da injeção do cascalho em cavernas de sal



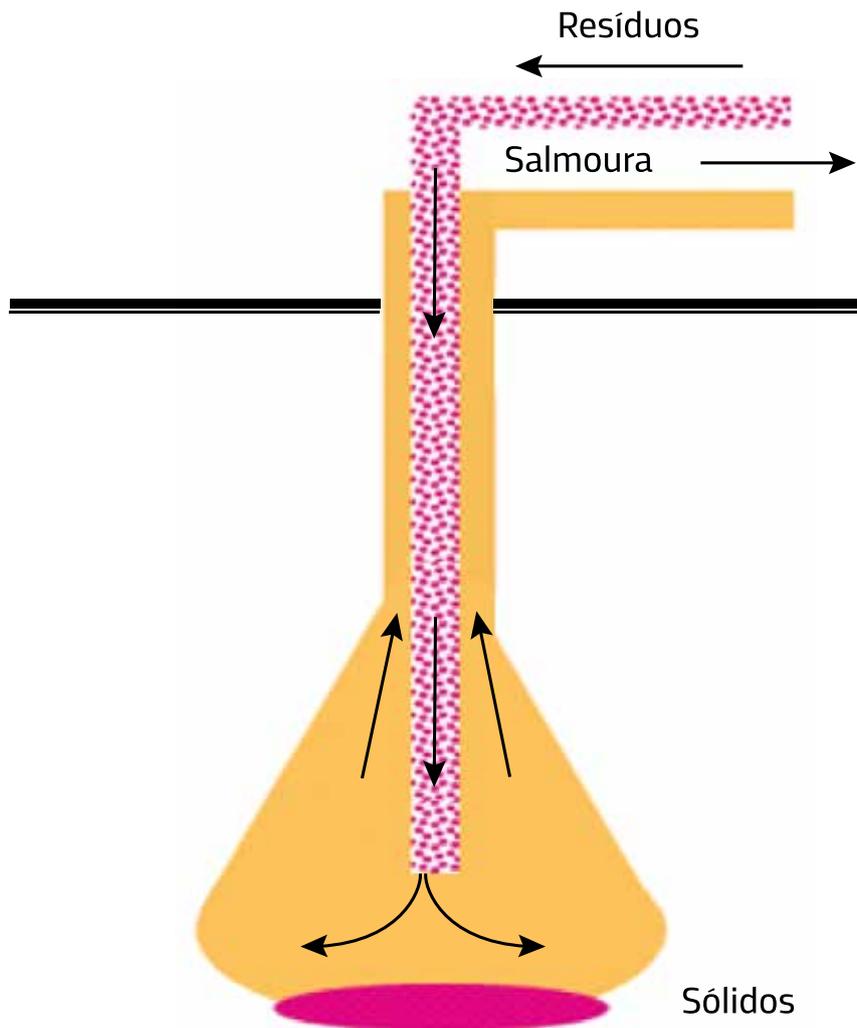
Fonte: Ganghis et al., 2009, apud Neto, 2017.

Muitos resíduos de exploração e produção são adequados para o descarte em cavernas de sal, incluindo fluidos de perfuração, cascalho, areias produzidas, solo contaminado, resíduos de limpeza de tanque de completção.

De acordo com Tomasko e Veil (1999), nos anos 90 cresceu o interesse no uso de cavernas de sal subterrâneas para a eliminação de resíduos. De modo que, no início daquela década, a Comissão Ferroviária do Texas emitiu licenças para vários operadores de cavernas salinas aceitarem resíduos não perigosos de campos petrolíferos e para uma caverna para descarte de materiais radioativos de ocorrência natural (NORM) das atividades de petróleo.

No Canadá, várias cavernas de sal também foram permitidas para descarte de resíduos não perigosos. Além disso, as agências de petróleo e gás da Louisiana e Novo México têm trabalhado no desenvolvimento de regulamentações para esse tipo de descarte (VEIL et al., 1998, 1999). No Texas, os padrões para disposição de resíduos em cavernas de sal estão estabelecidos pelo Código Administrativo do Texas (TAC), capítulo 331, revisado em março de 2019 (ELAWS. US, 2019).

Figura 21 – Esquema do processo de disposição dos resíduos em cavernas de sal



Fonte: Modificado de Argonne National Laboratory, 2008.

Segundo alguns operadores dessa metodologia, os benefícios da alternativa são: a localização das cavernas abaixo da água subterrânea permitindo total isolamento dos outros estratos pela rocha maciça, extrema estabilidade geológica dos domos salinos, baixo risco de fratura pois os evaporitos são impermeáveis e comportam-se como um material plástico e não quebradiço, mínimo manuseio dos resíduos e redução de impactos ambientais (IOGP, 2016; TRINITY ENVIRONMENTAL SERVICES, 2019).

Em relação aos custos, de acordo com Veil et al. (1999), a disposição em cavernas de sal é comparável ou inferior a outras tecnologias como aterro industrial e tratamento e agregação em artefatos cerâmicos.

1.4.2. Disposição em aterro industrial

De acordo com Bidone e Povinelli (1999), o aterro industrial é uma forma de disposição final de resíduos sólidos em solo dentro de normas e critérios, proporcionando um confinamento seguro dos resíduos, evitando, assim, danos ou riscos à saúde pública e minimizando os impactos ambientais (figura 22).

A disposição em aterros industriais é uma técnica comprovada e utilizada em outras regiões do mundo, principalmente em áreas de atividade de perfuração significativa como Golfo do México e no Mar do Norte. Em outras áreas, como a Austrália Ocidental, estão disponíveis aterros especializados

em resíduos industriais (CAPP, 2001). No Brasil, a disposição final de cascalho em aterro industrial é a alternativa mais comum quando o descarte no mar não é permitido, sendo, atualmente, também a principal solução para o cascalho gerado nas atividades de perfuração *onshore* (ALMEIDA, 2016). No Brasil, os aterros industriais estão presentes nos seguintes estados: São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo, Bahia, Maranhão, Rio Grande do Norte, Sergipe, Alagoas, Ceará, Pernambuco e Santa Catarina.

Apesar de simples, a disposição em aterros industriais possui restrições relacionadas com a umidade dos resíduos, necessidade de acondicionamento e, ainda, ao fato de que a disposição em aterro industrial não isenta o gerador das responsabilidades legais frente aos possíveis impactos ambientais.

A disposição final em aterros industriais no país segue a classificação de resíduos definida pela norma ABNT NBR 10.004/2004 (Resíduos sólidos – classificação). Esta norma classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública. Os resíduos são divididos em duas classes: classe I, dos resíduos perigosos; e classe II, dos resíduos não perigosos.

1.4.2.1 Aterro classe I

Segundo a ABNT NBR 10.004/2004 - Resíduos classe I (perigosos) são definidos como aqueles que apresentam periculosidade, podendo oferecer risco à saúde pública ou ao meio ambiente em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas.

Assim como os aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos têm normas específicas, os aterros de resíduos perigosos são projetados seguindo princípios técnicos específicos, estabelecidos pelas normas descritas a seguir:

- » apresentação de projetos de aterros de resíduos industriais perigosos – Procedimento – NBR 8.418/NB 842;
- » apresentação de projetos de aterros de resíduos perigosos - Critérios para projeto, construção e operação - NBR 10.157/NB 1.025.

A NBR 8.418/NB 842 define o aterro de resíduos industriais perigosos como a técnica de disposição de resíduos industriais perigosos no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública e à sua segurança, minimizando impactos ambientais.

Sendo assim, o aterro classe I é aquele preparado para receber exclusivamente resíduos perigosos.

Os fluidos e cascalho contaminados com óleo da formação podem ser enquadrados como resíduos classe I.

A figura 22 apresenta exemplos de aterro industrial.

Figura 22 – Exemplos de aterro industrial



Fontes: KWM, 2019; Geoenvi, 2011.

1.4.2.2 Aterro classe II

Os critérios para projeto, implantação e operação de aterros de resíduos não perigosos são estabelecidos pela ABNT NBR 13.896/1997.

Os resíduos não perigosos são classificados pela ABNT NBR 10.004/2004 como classe II A, não inerte; e classe II B, inerte.

Os resíduos não perigosos classe II A são aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I - perigosos ou de resíduos classe II B, nos termos da NBR 10.004/2004. Os resíduos classe II A

– não inertes podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

O anexo H da NBR 10.004/2004 cita alguns resíduos classificados como não perigosos. Entretanto, destaca-se em nota que se excluem aqueles contaminados por substâncias constantes nos anexos C, D ou E da norma e que apresentem características de periculosidade.

Já os resíduos classe II B são definidos como quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa segundo a ABNT NBR 10.007/2004 e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada a temperatura ambiente conforme ABNT NBR 10.006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água; excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor que são avaliados conforme anexo G (Padrões para o ensaio de solubilização) da ABNT NBR 10.004/2004.

Sendo assim, o aterro classe II é aquele preparado para receber exclusivamente resíduos não perigosos, que incluem fluidos e cascalho que não foram contaminados com óleo da formação, ou aqueles que foram contaminados, mas que receberam tratamento prévio de descontaminação ou solidificação e estabilização.

2 ANÁLISE PRELIMINAR QUALITATIVA DA VIABILIDADE SOCIAL, AMBIENTAL, ECONÔMICA E DE SEGURANÇA OCUPACIONAL E OPERACIONAL DAS ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS

Como visto anteriormente, o gerenciamento de resíduos faz parte da rotina da indústria petrolífera e é alvo de regulamentação e fiscalização por parte dos órgãos ambientais. A natureza e quantidade dos resíduos gerados durante a fase de perfuração, especificamente os fluidos e cascalho e os impactos potenciais ao meio ambiente têm demandado uma série de discussões e avanços tecnológicos com o objetivo de melhorar cada vez mais seu gerenciamento em todo o mundo.

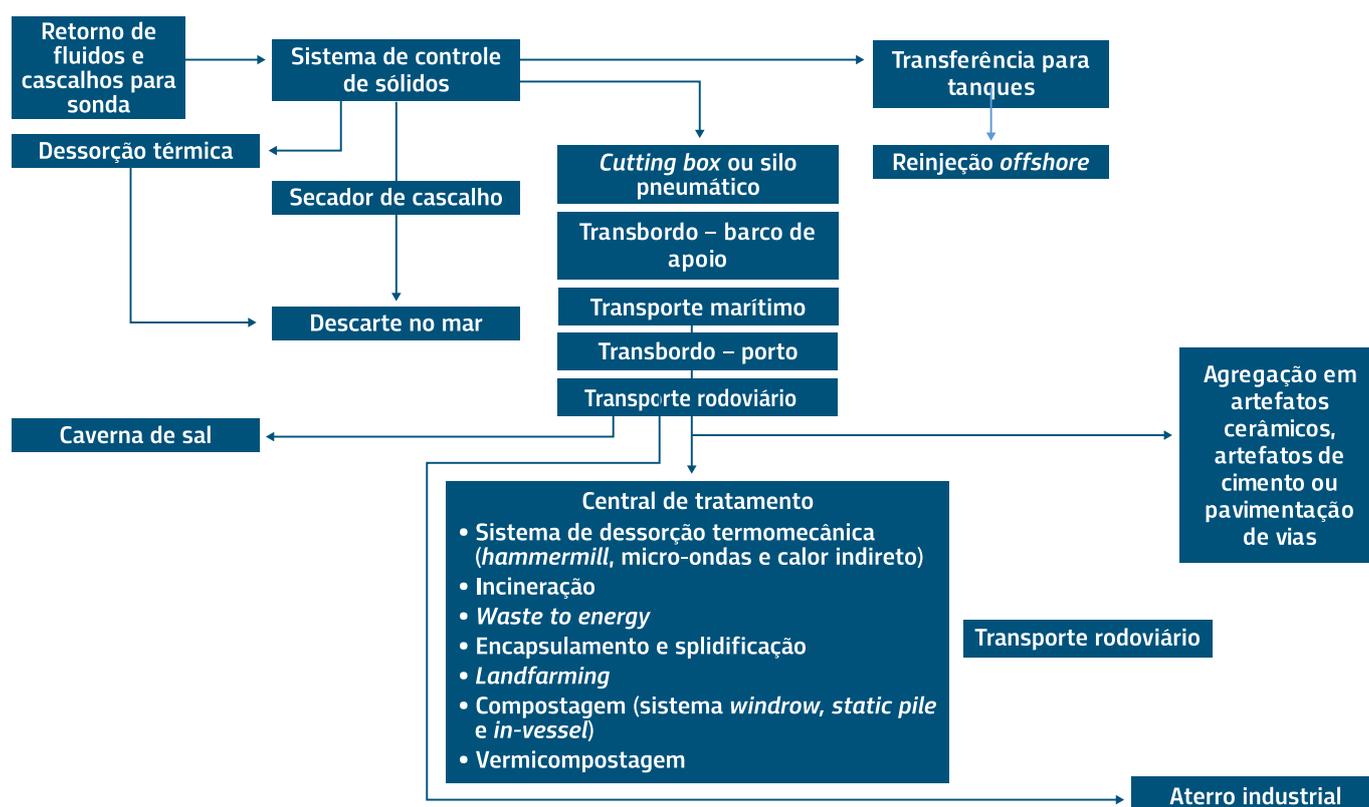
De acordo com CAPP (2001), entender as limitações econômicas, operacionais e ambientais das tecnologias de tratamento de resíduos disponíveis é um passo importante para selecionar a melhor tecnologia para uma área específica. É preciso entender os possíveis impactos ambientais do descarte no mar e compará-los aos potenciais impactos das alternativas de descarte em terra. De forma geral, os impactos incluem custos, uso de recursos, emissões atmosféricas, riscos de transporte e manuseio, riscos ocupacionais e exposição a produtos químicos (IOGP, 2016).

Tanto as operadoras de óleo e gás quanto os reguladores buscam adotar técnicas de gerenciamento de resíduos de perfuração que ofereçam benefícios ambientais e sejam consistentes com os princípios expressos na hierarquia de resíduos (abordagem que tenha como referência o princípio dos três Rs da sustentabilidade, pela redução do uso de matérias-primas e energia e do desperdício nas fontes geradoras, reutilização direta dos produtos e reciclagem de materiais).

No sentido de avaliar quais seriam as opções mais adequadas ao cenário nacional será apresentada a seguir a metodologia utilizada para análise qualitativa da viabilidade socioambiental e econômica das alternativas tecnológicas de tratamento e destinação final de resíduos no cenário descarte zero ou descarte no mar (figura 23). Cabe destacar que foram contempladas na análise as técnicas apresentadas nos fascículos 1 e 2, com exceção da hibernação e *waste to energy*, para as quais existe baixa disponibilidade de dados.

Na primeira etapa da avaliação foram consideradas as características de desempenho da própria tecnologia e elementos como: a) tipologia de fluido utilizado e resíduos gerados (principalmente em ambientes de descarte zero); b) transporte de resíduos para destinação final; c) infraestrutura existente ou projetada para gerenciar os resíduos; e d) conformidade legal (atendimento a limites de emissões atmosféricas) que podem ser tratados de forma diferenciada dependendo da alternativa em questão.

Figura 23 – Processos envolvidos em diferentes alternativas de destinação de cascalho de perfuração marítima



Fonte: Mott MacDonald, 2019.

Dessa forma, nos resultados da análise qualitativa da viabilidade, foram contemplados os seguintes aspectos técnicos, sociais, ambientais, econômicos e de segurança ocupacional e operacional:

- » aplicabilidade no país e sua distribuição regional;
- » custos de investimento e operacional;
- » vantagens e desvantagens da tecnologia incluindo a aplicabilidade por tipo de resíduo;
- » requisitos de segurança ocupacional e operacional;
- » limitações para aplicação em águas profundas; e
- » o impacto ambiental e social.

Por fim, os fatores relevantes ao processo de análise de cada uma das técnicas foram reunidos no anexo 1, elaborado com base na adaptação da metodologia da Canadian Association of Petroleum Producters (CAPP, 2001). De acordo com a metodologia, cada técnica é avaliada considerando pontuação graduada de (+) para aspectos positivos e (-) para aspectos negativos e (±) neutro, sendo o custo de sua aplicação por tonelada de resíduo avaliada como (\$) baixo, (\$\$) moderado e (\$\$\$) alto. Além disso, são apresentadas observações gerais relativas às demandas futuras para o cenário de descarte zero.

Cabe destacar que a etapa de tratamento *offshore* (anexo 1, quadro A) contempla o descarte no mar após a passagem pelo sistema de controle de sólidos e pela centrífuga vertical, enquanto o quadro E do anexo 1 agrega os processos de dessorção térmica/termomecânica, cujas características, restrições e aplicações são similares.

A técnica de separação de fases ou processamento por se tratar de um conjunto de processos que envolve tratamento físico, químico e térmico, terá sua etapa final (tratamento térmico) descrita por um dos processos apresentados nos quadros E, F ou G do anexo 1.

No sentido de tornar a análise crítica mais fluida, foram sumarizados na parte de resultados no quadro 2, os impactos sociais, ambientais, econômicos e de segurança ocupacional e operacional comuns a todas as técnicas de tratamento e destinação em terra.

Para avaliar quais técnicas seriam mais adequadas para gestão dos resíduos de perfuração, será avaliado o somatório de todos os aspectos positivos e negativos apresentados para cada técnica. Ressalta-se que os resultados apresentados nesta etapa são preliminares e serão alvo de análise mais apurada, pois não foram atribuídos pesos diferenciados a nenhum dos aspectos analisados no anexo 1, bem como também não foi avaliado o cenário futuro, com projeções de estimativas de resíduos gerados por poço e quantitativo de poços a serem perfurados nos próximos anos. Sendo assim, estes resultados servirão apenas de auxílio à escolha das técnicas abordadas no último capítulo dos fascículos, onde serão avaliados os indicadores ambientais de cada processo.

2.1 Elementos determinantes para seleção das alternativas de tratamento e destinação de resíduos

Neste tópico serão tratados elementos utilizados para seleção da metodologia mais adequada ao tratamento e destinação dos resíduos de perfuração. Como será visto a seguir, tanto a tipologia do resíduo, quanto a distância percorrida no transporte marítimo ou terrestre e a regulamentação podem restringir a aplicação de uma determinada técnica.

2.1.1 Tipologia de resíduos

Para escolha da técnica de tratamento ou destinação de resíduos deverá ser avaliada a tipologia de fluido utilizado e de cascalho gerado. Em face dos volumes gerados, a implementação do descarte zero pode se tornar um desafio tanto logístico quanto ambiental, técnico e econômico; se a alternativa de tratamento e destinação final não forem adequadas.

Entre as técnicas avaliadas no estudo apenas a reinjeção, a disposição em cavernas de sal, o micro-ondas, a incineração e a agregação em artefatos cerâmicos não possuem restrições de aplicação quanto à tipologia do resíduo.

Nos processos térmicos e termomecânicos, como por exemplo o *hammermill* e o tambor rotativo, podem ser tratados cascalhos com fluido de perfuração de base aquosa e não aquosa (contaminado e não contaminado). Contudo, existe restrição ao teor de umidade do cascalho, pois este parâmetro é capaz de impactar a *performance* dos equipamentos, fazendo com que seja necessário, às vezes, a combinação entre técnicas, neste caso, a centrifuga vertical. O mesmo ocorre para o coprocessamento, que requer a passagem dos resíduos pela etapa de blindagem.

Já o alto teor de sais existente em alguns fluidos pode ser uma barreira para aplicação das técnicas de solidificação e estabilização, e compostagem. Assim como a presença de cloretos é restritiva para as técnicas de *landfarming* e aproveitamento na construção civil.

Por sua vez, a simples deposição de resíduos de perfuração em aterros, apresenta o problema do fluido livre, visto que os resíduos de perfuração dificilmente são 100% sólidos e os aterros, em teoria, não foram concebidos para receber líquidos.

2.1.2 Transporte e destinação

O transporte de resíduos entre a locação e a base de apoio pode ser particularmente desafiador devido à necessidade de transferência para os barcos de apoio e às dificuldades de manuseio de grandes volumes de materiais em curtos períodos de tempo a bordo da plataforma de perfuração marítima.

Já no ambiente terrestre, o transporte de resíduos pode ocasionar maior pressão sobre o tráfego rodoviário (aumento de viagens), levando ao maior desgaste das vias e aumentando o quantitativo de emissões atmosféricas veiculares e o risco de acidentes rodoviários. Além disso, o transporte dos resíduos por vias terrestres esbarra numa série de requisitos legais, pois trata-se de material perigoso para a saúde de pessoas e com potencial impacto ao meio ambiente.

De maneira geral, a distância entre as bases de apoio e as centrais receptoras de resíduos será um ponto determinante para escolha do método de tratamento aplicado, pois o consumo de combustível e os impactos gerados podem tornar uma determinada metodologia inviável para regiões mais remotas.

2.1.3 Limitações de infraestrutura

Para o tratamento *offshore*, as limitações de espaço e peso na plataforma de perfuração podem restringir a escolha da tecnologia de gerenciamento de resíduos que será utilizada a bordo da unidade. As tecnologias adequadas para uso *offshore* devem, em geral, ser compactas de modo a adequar-se ao espaço limitado das plataformas e, também, permitir a certificação para os diversos padrões exigidos pela indústria de O&G tais como os padrões Marpol nº 73/78 relativos à poluição, atendimento às normas da Marinha do Brasil (Normans) ou padrões de projeto e de materiais dos certificadores DnVGL, Bureau Veritas, ABS. Além disso, a instalação de novos equipamentos pode exigir modificação estrutural e/ou atualizações, como aumento da capacidade de carga do convés. Isso requer estudos extensivos de engenharia que podem atrasar e comprometer o desenvolvimento dos projetos de perfuração marítima, considerando as unidades existentes.

No tocante às técnicas empregadas no ambiente *offshore*, cabe destacar que no cenário brasileiro se tem histórico de aplicação no tratamento prévio ao descarte no mar apenas do sistema de controle de sólidos e da centrífuga vertical. Dessa forma, a viabilidade de aplicação da técnica de dessorção termomecânica (*hammermill*) dependerá do processo de importação de equipamentos, enquanto outras mais complexas, como a reinjeção e hibernação, dependerão também de estudos para mapeamento de formações geológicas adequadas para recebimento dos resíduos e do estabelecimento de instrumentos regulatórios para essa prática.

No tocante à infraestrutura *onshore*, necessária para atender ao cenário de descarte zero, em áreas remotas com pouca ou nenhuma infraestrutura para destinação de resíduos, pode ser necessário o desenvolvimento de soluções de projeto específicas ou, ainda, o transporte de resíduos da locação para instalações de tratamento ou destinação existentes em outros estados. Dessa forma, a distância entre a locação do poço e a oferta de infraestrutura de apoio em uma dada região ajudará a determinar se podem ser usadas as instalações existentes ou se serão necessárias obras de ampliação ou construção de novas instalações portuária ou centrais de resíduos, sendo o Estado responsável pelas

políticas nacionais de trânsito e de transportes (aéreo, ferroviário, rodoviário e aquaviário, além das infraestruturas aeroportuária e portuária).

Cabe destacar que as seguintes técnicas *onshore*: dessorção termomecânica, calor indireto (tambor rotativo), solidificação e estabilização, *waste to energy*, cavernas de sal, aproveitamento para pavimentação de vias, utilização na construção civil e agregação em artefatos de cimento não foram aplicadas ainda no país, portanto sua viabilidade dependerá da importação de equipamentos, execução de estudos piloto, da adequação ao cenário das operações de E&P no país (volumes, tipos de produto e fluidos utilizados) e possível estabelecimento de processo de licenciamento ambiental das instalações físicas.

Outras técnicas como *landfarming*, compostagem (com exceção da variação da técnica que emprega reator biológico ainda não existente no país) e dessorção térmica figuram como metodologias potenciais, pois já contam com infraestruturas no território nacional para atendimento a resíduos sólidos urbanos ou industriais, sendo que precisariam ter seus processos otimizados para o tratamento específico dos resíduos da atividade de perfuração.

Para outras técnicas mais maduras como incineração, aterro industrial e coprocessamento e outras mais recentes tais como agregação em artefatos cerâmicos, micro-ondas e separação de fases, já existem empresas brasileiras licenciadas ou aptas para o recebimento dos resíduos da atividade de perfuração.

O quadro 1 a seguir apresenta o quantitativo de empresas dedicadas a cada uma das metodologias já existentes no Brasil.

Quadro 1 – Quantitativo de unidades destinadoras de resíduos

Técnica	Nº de unidades no Brasil	Nº de unidades no Brasil que atendem ao setor de óleo e gás
Coprocessamento	36	Sem informação
Blendagem para coprocessamento	19	13
Cimenteiras licenciadas para coprocessamento	35	Sem informação
<i>Landfarming</i>	3	–
Dessorção térmica	3	1
Micro-ondas	1	1
Sistema separador de fases	1	1
Agregação em artefatos cerâmicos	154*	Sem informação
Separação de fases	1	1
Incineração	23	8
Aterro industrial classe I	20	11
Compostagem	189	–

*Cerâmicas cadastradas na Associação Nacional da Indústria Cerâmica (Anicer).

Fontes: Abetre, 2013; Anicer, 2019; ABCP, 2015; De Paula, 2006; Mott MacDonald, 2019.

2.1.4 Limitações e restrições regulamentares

As práticas de gerenciamento dos resíduos provenientes das atividades de perfuração *offshore* variam consideravelmente em cada parte do mundo e são vinculadas geralmente a requerimentos legais impostos pelas agências reguladoras que protegem a saúde humana e o meio ambiente em suas jurisdições particulares. Dessa forma, para escolha das tecnologias a serem utilizadas deverão ser avaliados os requerimentos legais de cada região do país.

Como indicado ao longo dos fascículos 1 e 2, um dos entraves à aplicação de algumas técnicas pode ser a dificuldade de adequação às leis federais, estaduais, municipais, resoluções, manuais e normas técnicas que regulam e estabelecem diretrizes ambientais quanto ao uso e ocupação do solo, limites de emissões atmosféricas e descarte de efluentes, bem como também necessidade de licenciamento ambiental para atividades com potencial poluidor, como aterros.

A norma ABNT NBR ISO 13.894 (Tratamento no solo – *landfarming*) estabelece diretrizes para o projeto, construção, operação e manutenção das unidades. No tocante aos aterros, a apresentação de projetos de aterros de resíduos industriais perigosos deve seguir as normas NBR 8.418/NB 842 e as NBR 10.157/NB 1.025 no caso de aterros de resíduos perigosos.

Já para os processos de compostagem, as restrições existentes para aplicação do método estão relacionadas à adequação do produto final às normas para comercialização do fertilizante, estabelecidas pelas Instruções Normativas SDA nº 25/2009, SDA nº 27/2006, GM nº 46/2011, GM nº 53/2013 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

A atividade de coprocessamento é regulamentada pela Resolução Conama nº 264/99 que trata do licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de coprocessamento de resíduos e pela Resolução Conama nº 316/02 que aborda o sistema de tratamento térmico – dioxinas e furanos, existindo ainda regulações nos estados de São Paulo, Minas Gerais, Pará e Rio Grande do Sul.

As Resoluções Conama nºs 264/1999 e 316/2002 estabelecem limites de emissões atmosféricas resultantes do tratamento térmico. Esses limites são fixados para os poluentes gasosos, os materiais particulados, e, inclusive, para diversos metais e não metais, com especial ênfase para dioxinas e furanos. No entanto, a Resolução Conama nº 264/99 define "tratamento térmico como todo e qualquer processo cuja operação seja realizada acima da temperatura mínima de 800°C". Nesta definição não cabe a inclusão de tratamento por "dessorção térmica", que se faz a temperatura bem mais baixa, portanto, o licenciamento desta técnica deverá ser ordenado de acordo com a fonte de calor a ser empregada.

Outro aspecto da Resolução Conama nº 264/99 é a questão do transporte dos resíduos para a central de tratamento, que deverá atender à legislação específica constante da política ambiental do Ministério dos Transportes, uma vez que o transporte de produtos perigosos no Brasil é regulamentado pela ANTT, nos termos da Lei nº 10.233. O transporte rodoviário, por vias públicas, de produtos considerados perigosos para a saúde de pessoas e danosos ao meio ambiente deve ser submetido a regras e procedimentos estabelecidos pelo Regulamento para o Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos, Resolução ANTT nº 3.665/11, atualizada pela Resolução ANTT nº 5.848/19, complementada pelas instruções aprovadas pela Resolução ANTT nº 5.232/16 e suas alterações. O Ibama é o responsável pelas licenças ambientais para o transporte conforme a Instrução Normativa nº 5, de 9 de maio de 2012. Essa instrução do Ibama dispõe sobre o procedimento de autorização ambiental para o exercício

da atividade de transporte marítimo, interestadual, terrestre e fluvial de produtos perigosos (artigo 1º). O artigo 2º determina que o Ibama é responsável pelo desenvolvimento, implantação e operação do Sistema Nacional de Transporte de Produtos Perigosos.

Quando o transporte ocorre dentro de um só estado da Federação, deverá seguir as regras de licenciamento ou autorização ambiental para o transporte de produtos perigosos editadas pelo respectivo órgão estadual de meio ambiente, conforme artigo 8º da Lei Complementar nº 140/2011.

O aumento da frequência de transporte de resíduos implicará o aumento das emissões atmosféricas, o que pode comprometer a qualidade do ar, alterando assim a capacidade de saturação na bacia. Ressalta-se que a bacia atmosférica é considerada saturada com algum tipo de poluente quando o monitoramento apresenta valores de concentração acima dos limites máximos dos padrões de qualidade do ar, fixados pela Resolução Conama nº 491/2018. A bacia atmosférica está em via de saturação quando o monitoramento indica valores máximos próximos dos limites máximos dos padrões.

A Resolução Conama nº 382/2006, complementada pela Resolução Conama nº 436/2011, estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. O anexo XI da 436 fixa os limites de emissão de poluentes atmosféricos provenientes da indústria do cimento e especifica os limites máximos de emissões para fornos rotativos de clínquer com ou sem coprocessamento.

Cabe destacar que nenhuma dessas resoluções estabelece exigências quanto ao tratamento dos gases de exaustão dos fornos. Ocorre que os limites de emissão fixados na regulamentação são altos e as condições de dispersão atmosférica de poucos locais são favoráveis para a diluição das concentrações de modo a não violar os novos padrões de qualidade do ar publicados na Resolução Conama nº 491/2018.

Atualmente, conforme as Resoluções Conama nºs 491/2018 e 264/1999, estão em vigor os padrões intermediários PI-1, que são bem mais restritivos que os padrões em vigor até novembro de 2018. Progressivamente, serão adotados os padrões PI-2, PI-3 e, finalmente, o padrão final (PF) recomendado pela Organização Mundial de Saúde (OMS). Com a Resolução Conama nº 491/2018 ficará cada vez mais difícil demonstrar por meio de modelagem atmosférica a não violação dos padrões de qualidade do ar por instalações que queimam combustíveis fósseis.

O tratamento pela dessorção térmica por aquecimento indireto e direto, e pelo sistema de *hammermill*, ou por outros métodos, que demandem a queima de combustível, estará sujeito aos mesmos regulamentos relativos às emissões atmosféricas e aos impactos na qualidade do ar. Assim, deve ser antevisto o momento em que irá tornar-se obrigatória a instalação de filtros de material particulado (MP) e de sistemas de tratamento dos óxidos de nitrogênio em todas as fontes fixas de emissões atmosféricas, como já ocorre na Europa e em outras partes do mundo.

Além disso, no tocante a emissões por veículos pesados, a Resolução Conama nº 490/2018 estabelece na fase P8 do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve) limites ainda mais restritivos, resultando na necessidade de enquadramento das emissões veiculares em portos situados em bacias atmosféricas em via de saturação ou saturadas.

Com relação aos processos térmicos *onshore* (incineração, dessorção térmica e termomecânica), ainda existe a necessidade de envio dos efluentes (água recuperada no processo) para estações de

tratamento de efluentes antes do seu lançamento nos corpos hídricos, de forma a atender à legislação aplicável, incluindo a Resolução Conama nº 430/2011.

Por fim, para as técnicas de reciclagem, como agregação na fabricação de artefatos de cimento e utilização na construção civil, a alta variabilidade da qualidade do resíduo (concentração de óleo aderido ao cascalho, umidade, cloretos etc.) requer estabelecimento de normas e/ou especificações técnicas que levem em consideração o seu uso final, de forma a garantir a estabilidade a longo prazo dos materiais no ambiente, o que pode ser um processo dispendioso e demorado.

2.2 Resultado da análise qualitativa da viabilidade

No caso da segurança operacional, o cenário de descarte zero prevê a necessidade de maior movimentação de contentores e transferência de granéis, resultando, desta forma, em aumento do risco associado ao desempenho dessas atividades (em função do aumento da frequência de execução).

Cabe destacar que, a depender da tecnologia a ser adotada no descarte zero, os riscos operacionais e ocupacionais já serão conhecidos como é o caso dos içamentos de *cutting boxes* com o cascalho já seco (ver item 1.1); sendo necessária, neste caso, a adequação em termos da frequência de ocorrência da operação que possivelmente ocorrerá em número superior ao que é praticado hoje em dia. Esse aumento nas operações acarretará por exemplo: inspeção, avaliação e substituição de cabos de içamentos (eslingas) em intervalos menores aos usuais, já que estes alcançarão mais rapidamente seus limites de utilização.

No caso de serem adotadas novas tecnologias, tais como: o armazenamento do cascalho seco em silos pneumáticos e transbordo para navios especializados, e/ou a dessorção térmica na plataforma ou, ainda, a possibilidade de operações simultâneas. Nesses casos, também haverá necessidade de adequações físicas, de projeto e manutenção e outras adequações especialmente relacionadas às questões operacionais, prevenção de acidentes e mitigação da exposição dos trabalhadores. Estas alterações devem ser realizadas no âmbito de controle e avaliação de mudanças que faz parte do Programa de Gerenciamento de Riscos – PGR das plataformas..

Do ponto de vista ambiental, a análise dos cenários com ou sem descarte zero é mais complexa, existindo pontos a favor e contra as restrições de descarte. O descarte de fluido e cascalho no mar pode ocasionar impactos, principalmente sobre a comunidade bentônica. Por outro lado, a destinação de resíduos em terra poderá implicar o incremento de emissões atmosféricas associadas ao transporte e tratamento destes resíduos e todos os riscos ambientais relacionados ao seu manuseio em terra, como, por exemplo, o risco de alteração da qualidade da água subterrânea e do solo durante a etapa de tratamento.

O potencial de sensibilidade ecológica do local onde as operações de perfuração estiverem ocorrendo é a chave para o sistema de gerenciamento de resíduos a ser adotado (DANTAS, 2014). Em geral, salvo em regiões que concentram corais, a atividade de perfuração marítima em águas profundas gera impactos de menor magnitude e importância no ambiente se comparado aos impactos potenciais observados em águas rasas e costeiras, onde a zona marinha é ambientalmente mais vulnerável por oferecer menor resistência às intervenções antrópicas (IBAMA, 2009).

Quanto ao impacto nos custos, o descarte em terra depende do volume gerado, acondicionamento adequado, transporte (marítimo e terrestre), tratamento e destinação final, assim como o tempo demandado em função dessas atividades, visto que há custos operacionais atrelados a atrasos ou paradas nas operações. Esses serviços oneram a operação, e não são necessários quando o descarte ocorre no mar.

No sentido de tornar a análise crítica mais fluida são sumarizados no quadro 2 os impactos ambientais, socioeconômicos e de segurança ocupacional e operacional comuns a todas as técnicas de tratamento ou destinação em terra. Da análise do quadro 2, que resume os resultados obtidos no anexo 1, evidencia-se que somente na etapa de envio dos resíduos de perfuração para a terra temos 15 aspectos negativos e três positivos, sendo então adicionado este somatório a todas as técnicas indicadas no quadro.

De acordo com as informações apresentadas no anexo 1 e da análise do quadro 3, conclui-se que, entre as técnicas já existentes no cenário brasileiro e que poderiam ser aplicadas a curto prazo, a mais favorável em termos de aspectos positivos e de custos é o descarte no mar após tratamento prévio pelo sistema de controle de sólidos e centrífuga vertical. No entanto, como opção para o cenário de descarte zero, a metodologia de micro-ondas seria a que traria melhor balanço entre aspectos positivos e negativos, porém sua aplicação esbarra em problemas como a baixa disponibilidade de infraestrutura, visto que atualmente só temos uma unidade operando em escala comercial no território brasileiro, localizada no Rio de Janeiro e com capacidade de atendimento de aproximadamente 2 toneladas por hora, operando 20 horas por dia, 25 dias por mês. Cabe destacar que essa técnica possui custo bastante elevado quando comparada às demais amplamente utilizadas no país. No tocante ao tratamento de fluidos de base aquosa, a técnica de *dewatering* apresenta-se como vantajosa para fluidos não contaminados por óleo.

Dentre as técnicas com potencial de aplicação a médio prazo e que precisariam ser otimizadas para tratar os resíduos de perfuração, destaca-se a compostagem em pilhas estáticas aeradas por apresentar menor quantitativo de pontos desfavoráveis e melhor custo. Entre as metodologias ainda não existentes no país (médio e longo prazo), mas que possuem histórico de aplicação internacional, as que teriam maior benefício seriam as técnicas *offshore* de reinjeção e a dessorção térmica (*hammermill*), cuja viabilidade de aplicação esbarra na problemática de investimento econômico, aquisição de equipamentos e necessidade de estabelecimento de procedimentos regulatórios e de licenciamento ambiental. No caso da reinjeção, adicionam-se ainda à lista de restrições, a necessidade de estudos prévios para avaliar aspectos geológicos, de risco operacional e aplicação apenas em águas rasas.

Quadro 2 – Resumo dos impactos comuns a todas as técnicas de destinação final em terra em comparação ao descarte no mar

Técnicas de disposição em terra	Social	Ambiental	Econômico	Segurança ocupacional e operacional
D - Dessorção térmica	(+) Geração de empregos (+) Aumento de arrecadação tributária (-) Aumento do tráfego terrestre (-) Aumento do tráfego marítimo (-) Aumento da interferência sobre a atividade pesqueira artesanal/ industrial (-) Aumento da percepção sonora (-) Aumento da percepção de risco e poluição local (-) Aumento do desgaste de rodovias	(+) Redução da pressão sobre o ambiente marinho (-) Aumento de emissões atmosféricas durante o transporte terrestre e marítimo (-) Aumento do risco de abalroamento de cetáceos e quelônios	(-) Aumento do custo de logística de transporte e armazenamento de resíduos	(-) Aumento da exposição aos riscos associados às atividades (içamento, transferência, transporte, manuseio) (-) Risco de exposição a produtos químicos (-) Necessidade de transferências intermodais (-) Aumento do risco de colisões e contatos entre embarcações - Dificuldades de manuseio de material a bordo, podendo congestionar a plataforma de perfuração pela grande quantidade armazenada (-) Sujeito a efeitos das intempéries (-) Aumento do risco de vazamentos e perdas de produto
E - Tambor rotativo				
F - Micro-ondas				
G - Incineração				
H - Solidificação e estabilização				
I - <i>Landfarming</i>				
J, K, L - Compostagem				
M - Vermicompostagem				
N - <i>Dewatering</i>				
O - Utilização na construção civil				
P - Agregação em artefatos cerâmicos				
Q - Agregação em artefatos de cimento				
R - Pavimentação de vias				
S - Coprocessamento				
T - Disposição em cavernas de sal				
U - Aterro industrial				

Quadro 3 – Análise da viabilidade das alternativas tecnológicas de tratamento e destinação final de resíduos no cenário brasileiro

Ambiente	Quadro referência (Anexo 1)	Técnica	Aspectos		Custo médio
			Positivos	Negativos	
Offshore	A	Descarte no mar	21	11	Baixo
	B	Dessorção térmica	17	23	Moderado
	C	Reinjeção	17	21	Alto
Onshore	D	Dessorção térmica/termomecânica	17	23	Moderado
	E	Tambor rotativo	14	24	Moderado
	F	Micro-ondas	16	23	Alto
	G	Incineração	14	30	Alto
	H	Solidificação e estabilização	9	31	Baixo
	I	<i>Landfarming</i>	7	29	Baixo
	J	Compostagem - sistema de leiras revolvidas	11	35	Baixo
	K	Compostagem - pilhas estáticas aeradas	19	31	Baixo
	L	Compostagem - reator biológico	13	30	Baixo
	M	Vermicompostagem	11	35	Baixo
	N	<i>Dewatering</i>	18	8	Baixo
	O	Utilização na construção civil	7	25	Alto
	P	Agregação em artefatos cerâmicos	6	27	Baixo
	Q	Agregação em artefatos de cimento	5	25	Alto
	R	Pavimentação de vias	6	26	Baixo
	S	Coprocessamento	6	22	Moderado
	T	Cavernas de sal	11	25	Baixo
U	Aterro industrial	11	35	Moderado	

Legenda: amarelo – técnica existente no Brasil; verde – técnica existente, mas que precisa ser otimizada para receber resíduos de perfuração e azul – técnica inexistente no Brasil.

3 ANEXO I

Clique no link abaixo para acessar o Anexo I.

<https://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/2021/10/anexo-1-analise-critica-das-metodologias.pdf>

DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS. Manual da Marca. 2020.

ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. *Panorama do coprocessamento*. Brasil. 2015.

ABETRE – Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos. *Perfil do setor de tratamento de resíduos*. Abril de 2013.

ABNT. Norma Brasileira ABNT NBR 10004. Resíduos sólidos – classificação, 2004, 71 p.

AHAMMAD, S. M. D. et al. Drilling waste management and control the effects. *Journal of Advanced Chemical Engineering*. 2017, 9p. Disponível em: <<https://www.longdom.org/open-access/drilling-waste-management-and-control-theeffects-2090-4568-1000166.pdf>>. Acesso em: 26 jul. 2019.

AL-ANSARY, M. S.; AL-TABBAA, A. Comparison of stabilised/solidified mixed of model drill cuttings based on the North Sea and red sea areas. *SPE Publication 106799*. SPE E&P Environmental and Safety Conference Held in Galvesion, Texas. U.S.A., 5-7 March 2007.

ALMEIDA, P. C. de. *Análise técnico-ambiental de alternativas de processamento de cascalho de perfuração offshore*. Rio de Janeiro. 2016. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

ALVES, J. O. et al. Landfarming in the treatment by Cetrel of organic waste from a petrochemical to remediate oil contaminated soil. *Journal of Soil Contamination*, v. 5, n. 3, p. 243-260, 1996.

ANICER – Associação Nacional da Indústria Cerâmica. Banco de dados dos associados. 2019. Disponível em: <<https://www.anicer.com.br/nossos-associados/ceramicas/>>. Acesso em: 15 out. 2019.

ARARAUNA JR, J. T.; BURLINI, P. *Gerenciamento de resíduos na indústria do petróleo e gás: os desafios da exploração marítima no Brasil*. Rio de Janeiro: Elsevier. PUC-Rio, 2014.

ARGONNE NATIONAL LABORATORY. *Drilling waste management technology descriptions*. 2008, 50p. Disponível em: <http://www.oilfieldtrash.com/custom/php/files/1252686135Drilling_Waste_Management_Technology_1_.pdf>.

BARROS, R. M. M. *Incorporação do resíduo de cascalho de perfuração de poços de petróleo em formulações cerâmicas*. 2015. 107f. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. Rio Grande do Norte. 2015.

BIDONE, F. R. A.; POVINELLI, J. *Conceitos básicos de resíduos sólidos*. São Carlos: EESC/USP, 1999.

BORGES-CAMPOS et al. *Análise quantitativa de cascalhos com FPBNA descartados ao mar e destinados em terra conforme padrões anteriores e novos requisitos do órgão ambiental brasileiro – Ibama*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis – IBP. 2016.

BURNETT, D. B.; PLATT, F. M. *Low impact testing of oil field access roads: Reducing the environmental footprint in desert ecosystems* – 07123.01. Final. Research Partnership to Secure Energy for America – RPSEA, 2014. 55p.

CAPP – Canadian Association of Petroleum Producers. *Offshore drilling waste management review*. Calgary: CAPP, 2001.

CARVALHO, P. R. dos S. Gerenciamento da destinação de resíduos de operações offshore: aplicação do pensamento de ciclo de vida na otimização dos custos de neutralização de CO₂. Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Coppe, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012. 200p.

CASTRO, R. A. et al. *Otimização do sistema de landfarming da RPBC – Refinaria Presidente Bernardes*. In: 3. Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, 2005.

DANTAS, R. P. P. *Estudo da incorporação de resíduos de perfuração para aplicação em cimentação de poços de petróleo*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências Exatas e da Terra. Instituto de Química. Natal, RN, 2014.

DE PAULA, A. M.; SOARES, C. R. F. S.; SIQUEIRA, J. O. Biomassa, atividade microbiana e fungos micorrízicos em solo de "landfarming" de resíduos petroquímicos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 10, n. 2, p. 448-455, 2006.

ELAWS.US. *Código administrativo do Texas*. 2019. Disponível em: <http://txrules.elaws.us/rule/title30_chapter331consulta>. Acesso em: 29 jul. 2019.

EPA – United States Environmental Protection Agency. *How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites: A guide for corrective action plan reviewers*. 2017. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-03/documents/tum_ch4.pdf>. Acesso em: 19 out. 2019.

FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P da. *Manual prático para compostagem de biossólidos*. 1. ed. Rio de Janeiro: Abes. 1999.

FERRARI, R. *Coprocessamento de resíduos industriais em fornos de clínquer*. [S.l.]. Cia. de Cimento Itambé. 2014.

FIALHO, P. F. *Substituição de areia em concretos por resíduos da perfuração de poços de petróleo*. 2012a. Anais do 54. Congresso Brasileiro do Concreto. Maceió. Alagoas. 2012.

FIGUEIRA JR, E. A. *Projeto industrial para aeração automática de leiras de compostagem orgânica*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2012. 86f.

FIN, E. et al. *Panorama do coprocessamento de resíduos industriais com características de inflamabilidade no Rio Grande do Sul*. In: 1. Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade. Gramado. 2018.

GANGHIS, D.; ALARSA, M.; TRENTINI, S. *Alternativa para destinação final de cascalho de perfuração de poços de petróleo onshore gerados no Nordeste do Brasil*. In: 1. Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo. 2009.

GEOENVI – Geologia e Meio Ambiente. *Entenda a diferença entre lixão e aterro sanitário*. 2011. Disponível em: <<http://geoenvigeologia.blogspot.com/2011/05/entenda-diferenca-entre-lixao-e-aterro.html>> Acesso em: 29 jul. 2019.

GETLIFF, J. et al. *Drilling fluids design and the use of vermiculture for the remediation of drill cuttings*. In: Conference Drilling & Completion Fluids and Waste Management Conference. 2002. 20p.

HALLIBURTON. *Enviro-Floc drilling fluid dewatering system. Drilling waste management*.

H010925 02/14. 2014. 2p.

_____. *Thermal desorption unit*. 2019. Disponível em: <<https://www.halliburton.com/en-US/ps/baroid/fluid-services/waste-management-solutions/waste-treatment-and-disposal/thermalprocessing-systems/default.html>>. Acesso em: 26 jul. 2019.

HLINVEST. *Scomi energy – Global Research and Technology Centre*. 2014. Disponível em: <<https://klse.i3investor.com/blogs/hleresearch/47788.jsp>>. Acesso em: 26 jul. 2019.

HUME, T. Making black gold fit for the road. *Energy Pipeline*, Feb. 2015. Disponível em <http://www.tracyhume.com/wp-content/uploads/2014/02/EnergyPipeline_Feb15_RecycledDrillCuttings.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2020.

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Ambientais Renováveis. *Nota Técnica CGPEG/Ibama n. 05/09*. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/phocadownload/licenciamento/petroleo-e-gas/notas-tecnicas/2009-05-NT-cgpeg-ibama-aia-perfuracao-em-aguas-profundas.pdf>>. Acesso em: 12 abr. 2019

_____. *Diretrizes para uso e descarte de fluidos de perfuração e cascalhos, fluidos complementares e pastas de cimento nos processos de licenciamento ambiental dos empreendimentos de perfuração marítima de poços de exploração e produção de petróleo e gás nas atividades de perfuração marítima de poços e produção de petróleo e gás*. 2019.

IBP. *Manual de gerenciamento de resíduos*. 2014. In: Apostila de gerenciamento de resíduos em bases portuárias para atividades de exploração e produção de petróleo e gás natural. Módulo específico operador. Sistema FIRJAN, 2016, 26p.

IOGP – International Association of Oil and Gas Producers. *Drilling waste management technology review*. England and Wales: IOGP. 2016.

IOM3. *Microwave processing heats up oil drill cuttings*. 2019. Disponível em: <<https://www.iom3.org/materials-world-magazine/news/2009/jan/01/microwave-processing-heats-oil-drill-cuttings>>. Acesso em: 29 jul. 2019.

JERÔNIMO, C. E. M., KITZINGER, W. G. C. M. Dimensionamento de um landfarming para tratamento de borras oleosas utilizando critérios de um reator batelada. *Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas*, v. 18, n. 3, p. 1273-1285, 2014.

KLASENER, I. C. Biorreatores: você sabe como eles funcionam? *Profissão Biotec*, 2019. Disponível em: <<http://profissaobiotec.com.br/biorreatores-como-eles-funcionam/>>. Acesso em: 1 jul. 2019.

KWM – Kapersul Waste Management. *Aterro industrial classes I e II*. 2019. Disponível em: <<http://kwm.eco.br/aterro-industrial-classe-i-e-ii/>>. Acesso em: 29 jul. 2019.

LEONARD, S. A.; STEGEMANN, J. A. Stabilization/solidification of petroleum drill cuttings. *Journal of Hazardous Materials*, v. 174. p. 463-472. 2010.

LOURENÇO, N. Vermicompostagem: uma solução de fertilidade e sustentabilidade para o espaço rural. *Agrotec*, Portugal, n. 2, mar. 2012. Disponível em: <<http://www.agrotec.pt/noticias/vermicompostagemfertilidade-e-sustentabilidade/>>. Acesso em: 1 jul. 2019.

LUNA, W. da S. *Solos contaminados com hidrocarbonetos leves de petróleo: estudo comparativo do tratamento por dessorção térmica em relação ao coprocessamento em fornos de clínquer*. 2008, 79p.

Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: <http://cassiopea.ipt.br/teses/2008_TA_Vagner_Silva_Luna.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2020.

MACHADO, C. F. *Incineração: uma análise do tratamento térmico dos resíduos sólidos urbanos de Bauru/SP*. 2015. 88p. Projeto de Graduação – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

MATEUS, C. M. D. et al. *Monitoramento da temperatura no processo de compostagem de lodo de tratamento de efluente com casca de eucalipto e bagaço de cana-de-açúcar*. In: Fórum Internacional de Resíduos Sólidos, 8. 2017. Curitiba. Anais.

MELCHERT, M. B. M. *Solidificação e estabilização de resíduos de catalisadores contendo níquel e alumínio em cimento Portland*. 2012. 142f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2012.

MENDES, F. S.; SOUSA, C. A. de. Coprocessamento em fornos de clínquer: uma alternativa sustentável para destinação do resíduo de cascalho de perfuração de poços de petróleo em Mossoró-RN. *RUnPetro*, v. 1, n. 1, nov. 2012/abr. 2013.

MENESES, C. G.; PAULA, G. de A. Avaliação do resíduo de cascalho de perfuração de poços de petróleo da Bacia Potiguar e alternativas para sua destinação e reaproveitamento. *RUnPetro*, v. 3, n. 1, p. 29-38, out. 2014/mar. 2015. ISSN 2316-6681.

MENEZES, R. A. A. et al. *Estágio atual da incineração no Brasil*. In: VII Seminário Nacional de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública, Curitiba, 2000. Disponível em: <<http://www.resol.com.br/textos/Estado%20Atual%20da%20Incineracao%20no%20Brasil.htm>>. Acesso em: 19 jun. 2020.

- M-I SWACO. *Solids control, cuttings management & fluids processing. Drilling environmental solutions*. 2014.
- MOHAMMADI, M. K. et al. *Drilling waste management: Improvements to the dewatering process through chemical optimisation – results of a pilot test*. SPE/IADC, 4p, 2006.
- NEGRÃO, M.; de ALMEIDA, A. A. Incineração de resíduos: contexto e riscos associados. Fundação Frances Libertés. 15 jul. 2010.
- NETO, J. B. A. *Aproveitamento do cascalho de perfuração de poços para elaboração de pasta de cimentação primária*. 2017. 139f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão. Sergipe. 2017.
- NUNES, R. R. et al. Vermicomposting as an advanced biological treatment for industrial waste from the leather industry (tanneries). *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, v. 51, n. 5, p. 271-277, 2016.
- OLIVEIRA, J. R. *Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos e industriais*. Disciplina de Mestrado. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, 2004. Apresentação de slides.
- OPETE, S. E. O.; MANGIBO, I. A.; IYAGBA, E. T. Stabilization/solidification of synthetic Nigerian drill cuttings. *African Journal of Environment Science and Technology*, v. 4. p. 149-153, 2010.
- PAULA, G. A. *Avaliação do resíduo de cascalho de perfuração de poços de petróleo da Bacia Potiguar e alternativas para sua destinação e reaproveitamento*. 2014. Natal. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharias e Ciências Exatas, Universidade Potiguar. 55p. 2014.
- PEREIRA JR. N.; BON, E. P. da S.; FERRARA, M. A. Tecnologia de bioprocessos. *Séries em Biotecnologia*, v. 1, 62p. Rio de Janeiro: UFRJ, 2008.
- PEREIRA NETO, J. T. *Manual de compostagem: processo de baixo custo*. Belo Horizonte: UNICEF, 1996. 56p.
- PEREIRA, M. S. *Caracterização de cascalho e lama de perfuração ao longo do processo de controle de sólidos em sondas de petróleo e gás*. 2010. 129f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.
- _____ et al. *Tests show potential of alternative method for offshore cuttings drying*. 2013. Disponível em: <<http://www.drillingcontractor.org/tests-show-potential-of-alternative-method-for-offshore-cuttings-drying-25578>>. Acesso em: 2 jul. 2019.
- _____. *Aplicação de secagem por micro-ondas no tratamento de cascalho de perfuração*. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.
- PERUZZO, R. et al. Comparação do uso de vermicomposto e composto como agente de degradação de biodiesel B100. 2018. *Revista Ciatic*, Universidade de Passo Fundo, v. 10, n. 2, p. 14-26, 2018.
- PETRI JUNIOR, I. *Secagem por micro-ondas na descontaminação de cascalhos de perfuração*. 131f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

PIRES, A. B. *Análise de viabilidade econômica de um sistema de compostagem acelerada para resíduos sólidos urbanos*. 2011. 65p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2011.

PIRES, P. J. M. *Utilização de cascalho de perfuração de poços de petróleo para a produção de cerâmica vermelha*. Rio de Janeiro, 2009. 173p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

PRIMAZ, M. et al. Aplicação da compostagem e da vermicompostagem em solo contaminado com óleo lubrificante usado. *Univates. Destaques Acadêmicos, Lajeado*, v. 9, n. 4, p. 121-133, 2017.

REVALORE. *Coprocessoamento*. 2019. Disponível em: <<http://www.revalore.com.br/site/coprocessoamento/>>. Acesso em: 28 maio 2019.

RIBEIRO, S. G. *Geração de energia elétrica com resíduos sólidos urbanos – usinas “waste-to-energy” (WTE)*. WTERT – Brasil. 2010. Disponível em: <http://www.wtert.com.br/home2010/arquivo/publicacoes/usinas_lixo_energia_no_brasill.pdf>. Acesso em: 1 jul. 2019.

ROBISON, J. P. et al. Scale up and design of a continuous microwave treatment system for the processing of oil contaminated drill cuttings. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 88, n. 2, p. 146-154, 2010.

SCHLUMBERGER. *Centrifuga vertical*. 2019. Disponível em: <<https://www.slb.com/drilling/drilling-fluidsand-well-cementing/solids-control/cuttings-dryers>>. Acesso em: 23 jul. 2019.

SCHMIDELL, W. et al. *Biotecnologia industrial: engenharia bioquímica*. São Paulo: Blucher, 2001. v. 2, 541p.

SILVA, M. A. do R. *Solidificação e estabilização de resíduos inorgânicos industriais: estudo da eficiência do processo e evidência de mecanismos de imobilização*. 110f. Tese (Doutorado em Química). Programa de Pós-Graduação em Química da Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

SIOEN, H.; RIBEIRO, S. G. *Integration of anaerobic digestion with grate incineration results in optimized energy and material recovery of MSW*. [s.d]. Disponível em: <http://www.wtert.com.br/home2010/arquivo/noticias_eventos/Paper%20Herman%20e%20Sergio%20ISWA15%20World%20Congress.pdf>. Acesso em: 4 jul. 2019.

STEPHENSON, R. L. et al. *Thermal desorption of oil from oil-based drilling fluids cuttings: Processes and technologies*. In: SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, 2004, Perth. Society of Petroleum Engineers: Perth, 2004.

THEMELIS, N. J. et al. *Guidebook for the application of waste to energy technologies in Latin America and the Caribbean*. EEC/IDB, 2013.

THOMAS, J. E. (Org.) *Fundamentos de engenharia de petróleo*. Rio de Janeiro: Interciência/Petrobras, 2001.

TOMASKO, D.; VEIL, J. A. *New public information resources on salt caverns*. In: 1999 Annual Forum – Ground Water Protection, 1999.

TRINITY ENVIRONMENTAL SERVICES, 2019. Disponível em: <<http://trinityenv.com/services#e-p-wastedisposal>>. Acesso em: 5 abr. 2019.

VEIL et al. *An introduction to salt caverns e their use for disposal of oil field wastes*. 1999. Disponível em: <<http://www.veilenvironmental.com/publications/oil/SaltCavbroch.pdf>>. Acesso em: 5 abr. 2019.

VEIL et al. *Disposal of NORM – contaminated oil*. 1998. Disponível em: <<http://www.evs.anl.gov/downloads/Veil-et-al-1998-Salt-Cavern-Risk-Assessment.pdf>>. Acesso em: 5 abr. 2019.

VGRESÍDUOS. *Incineração de resíduos: quando ela deve ser uma boa opção?* 9 out. 2018. Disponível em: <<https://www.vgresiduos.com.br/blog/incineracao-de-residuo>>. Acesso em: 28 maio 2019.

IBP – Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás

Presidente

Eberaldo de Almeida Neto

Diretora Executiva Corporativa

Cristina Pinho

Diretor Executivo de E&P

Flávio Vianna

Gerência Executiva de SMS e Operações

Anderson Cantarino

Carolina Coimbra

Daniel Aquino

Grupo de Trabalho de Fluidos e Cascalhos

Coordenador: Leonardo Marinho

Expediente:

**Gerente de Comunicação e Relacionamento
com Associados**

Adriana Barbedo

Coordenação Editorial

Priscila Zamponi

Demy Gonçalves

Projeto Gráfico

Trama Criações de Arte

Banco de Imagens

IBP

Foto da capa

Anderson Cantarino



IBP – Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás

Av. Almirante Barroso, 52 – 21º e 26º andares – RJ – Tel.: (21) 2112-9000

