



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO DE ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

IGO JOSÉ DE GÓIS MAIA

**ESTUDO DO PROCESSO DE INERTIZAÇÃO DE CASCALHO DE
PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO COM MISTURAS
EMULSIONADAS NA EMPRESA ENFIL S/A CONTROLE AMBIENTAL**

MOSSORÓ/RN

2017

IGO JOSÉ DE GÓIS MAIA

**ESTUDO DO PROCESSO DE INERTIZAÇÃO DE CASCALHO DE
PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO COM MISTURAS
EMULSIONADAS NA EMPRESA ENFIL S/A CONTROLE AMBIENTAL**

Relatório de estágio curricular supervisionado realizado na Empresa Enfil S/A Controle Ambiental, sob orientação do Professor Doutor Rafael Barbosa Rios, como pré-requisito para obtenção do título de Engenheiro Químico pela Universidade Federal Rural do Semi-Árido.

MOSSORÓ/RN

2017

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

M217e Maia, Igo José de Góis.
ESTUDO DO PROCESSO DE INERTIZAÇÃO DE CASCALHO
DE PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO COM MISTURAS
EMULSIONADAS NA EMPRESA ENFIL S/A CONTROLE
AMBIENTAL / Igo José de Góis Maia. - 2017.
35 f. : il.

Orientador: Rafael Barbosa Rios.
Relatório (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Química, 2017.

1. Inerteização. 2. Cascalho. 3. Petróleo. 4.
Tensoativo. I. Rios, Rafael Barbosa , orient. II.
Título.

**ESTUDO DO PROCESSO DE INERTIZAÇÃO DE CASCALHO DE
PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO COM MISTURAS
EMULSIONADAS NA EMPRESA ENFIL S/A CONTROLE AMBIENTAL**

Relatório de estágio curricular supervisionado
realizado na Empresa Enfil S/A Controle
Ambiental, sob orientação do Professor Doutor
Rafael Barbosa Rios, como pré-requisito para
o título de Engenheiro Químico pela
Universidade Federal Rural do Semi-Árido.

Aprovado em: 17 / 05 / 2017

BANCA EXAMINADORA

Rafael Barbosa Rios

Prof. Dr. Rafael Barbosa Rios – UFERSA – Orientador

Marcelo Batista de Queiroz

Prof. Dr. Marcelo Batista de Queiroz – UFERSA – Primeiro membro

João Miller de Melo Henrique

Msc. João Miller de Melo Henrique – UFRN – Segundo membro

The Gods will offer you chances. Know them. Take them.
(Charles Bukowski)

RESUMO

O cascalho de perfuração é um resíduo gerado em grande quantidade no processo de perfuração de poços de petróleo e que pode provocar impactos ambientais, tais como a contaminação do solo e consequentemente a contaminação de lençóis freáticos. Os principais contaminantes presentes no cascalho de perfuração incluem hidrocarbonetos, sais solúveis, em alguns casos, metais pesados, além de elementos que causam demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO) e, por fim, elementos de causam alcalidade. Vários processos para remediação de solos contaminados por óleos e outros produtos da indústria do petróleo têm sido propostos na literatura, tais como: a biorremediação; o processo Fenton; a injeção de vapor e a incineração *in situ*. Porém, estes processos geralmente têm elevados custos operacionais. A utilização de tensoativos para a remediação de solos contaminados por petróleo e seus derivados vem sendo estudada por vários pesquisadores, demonstrando seu potencial de aplicação na descontaminação dos solos. O presente trabalho pretende desenvolver um estudo sobre um processo de inertização dos resíduos sólidos contaminados com hidrocarbonetos da indústria do petróleo utilizando misturas emulsionadas para reclassificação desses resíduos sólidos. Esse processo consiste em, a partir de misturas líquidas contendo substâncias tensoativas – que promovem a miscibilidade de óleo em água – extrair substâncias químicas de interesse (contaminantes) da matriz sólida para a líquida. Os testes de bancada realizados nesse experimento com óleo vegetal saponificado se mostraram eficientes, pois com apenas um ciclo de inertização já houve uma redução significativa no percentual de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPA's) e no Teor de Carbonos Orgânicos Totais (TOC), além de uma redução de aproximadamente 62% no teor de NaCl das amostras de resíduos oriundos das atividades de perfuração de poços petrolíferos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura química do ácido láurico e do ácido ricinoléico.	13
Figura 2 – Comportamento das curvas de secagem / tempo.....	14
Figura 3 – Processo de lavagem	16
Figura 4 – Vistas laterais do equipamento.....	18
Figura 5 – Ilustração e foto da peneira vibratória de caixa inferior para mistura de inertização.....	18
Figura 6 – Ilustração e foto do tambor rotativo e fluxograma com a peneira vibratória e o sistema de recirculação com bomba	19
Figura 7 – Alimentação de sólidos no tambor rotativo, a lama verde para uma peneira vibratória	19
Figura 8 – Exemplo de galpão de secagem solar	20
Figura 9 – Visão geral do galpão de secagem solar e equipamentos	21
Figura 10 – Fluxograma do processo.....	22
Figura 11 – Curva de correlações “Condutividade x [NaCl]”	24
Figura 12 – Teor de NaCl (ppm) no decorrer de 8 ciclos de inertização	25
Figura 13 – Curva Granulométrica - Amostra 1	27
Figura 14 – Curva Granulométrica - Amostra 2	28
Figura 15 – Curva de Secagem para 42 °C	32
Figura 16 – Curva de Secagem para 38 °C	32
Figura 17 – Curva de Secagem para 32 °C	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Concentrações de NaCl e suas respectivas condutividades.....	23
Tabela 2 – Percentual de remoção dos HPA's com a inertização	26
Tabela 3 – Classificação da amostra de Solo 1.	28
Tabela 4 – Classificação da amostra de Solo 2	29
Tabela 5 – %TOC para amostras de #30 (Areia Grossa) limpa e contaminada com 50% de óleo	29
Tabela 6 – %TOC para amostras de #50 (Areia Fina) limpa e contaminada com 50% de óleo.	30
Tabela 7 – Tabela de resultados experimentais.....	31

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. ONJETIVOS	11
3. EMPRESA ENFIL S/A – CONTROLE AMBIENTAL	11
3.1. Tratamento de água e efluentes	11
3.2. Controle da poluição atmosférica	11
3.3. Gestão de resíduos e gerenciamento de áreas contaminadas	12
3.4. Cogeração a partir do lixo	12
3.5. Construções e montagens	12
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
4. METODOLOGIA	15
4.1. Apresentação e descrição do equipamento piloto	17
4.2. Galpões de Secagem Solar	19
4.2.1 Secagem	22
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	22
5.1 Resultados de NaCl e HPA's	23
5.2 Resultados de granulometria e Teor de Carbono Orgânico Total – TOC	27
5.3 Resultados de Experimentais de Secagem	30
6. CONCLUSÕES	33
7. SUGESTÕES PARA A MELHORIA DO PROCESSO	34
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35

1. INTRODUÇÃO

É consenso, a nível internacional, que o potencial dos resíduos provenientes das atividades de perfuração de poços de petróleo pode causar danos à saúde e ao meio ambiente, a partir da contaminação de aquíferos e solos quando há uma disposição inadequada do cascalho gerado. O eficiente gerenciamento dos resíduos pode reduzir os danos causados ao meio ambiente, custos operacionais e potenciais responsabilidades futuras.

Atualmente, a alternativa para o gerenciamento do cascalho de perfuração é através do co-processamento, que destina esse resíduo de forma adequada para a incineração em fornos de cimento, de forma a obter cinzas inertes. Porém, dessa forma, há um custo elevado para a destinação dos resíduos e não há nenhum retorno.

No processo de perfuração de poços de petróleo, é produzida uma grande quantidade de resíduos, dentre eles, o fluido e o cascalho de perfuração. O controle desses resíduos tem sido um problema para a indústria de petróleo e gás por causa da quantidade gerada e seus contaminantes, que podem ser orgânicos ou inorgânicos.

A lama de perfuração (ou fluido de perfuração) pode ser definida como fluido à base de água salgada que possui salinidade superior a 1000 ppm de NaCl, com controlada concentração de sólidos (devido sua influência na densidade, viscosidade e forças géis, limites de escoamento e parâmetros de filtração).

Durante a perfuração de poços de petróleo, o processo que ocorre é a trituração da rocha. Para auxiliar na trituração da rocha, o fluido de perfuração é utilizado podendo conter sais, cloretos, ser de base aquosa ou oleosa (contendo hidrocarbonetos). O cascalho de perfuração nada mais é do que a rocha triturada com a presença de componentes do fluido.

A finalidade do tratamento do cascalho de perfuração é a remoção dos contaminantes presentes no mesmo ou reduzir o teor desses componentes perigosos, visando seu reuso ou descarte de forma a não agredir o meio ambiente. A escolha do tipo de tratamento a ser empregado é minuciosa e deve levar em consideração diversos fatores, tais como custos de implantação, tempo, espaço requerido e fatores técnicos, como equipamentos e logística (BALL *et al.*, 2011).

Atualmente, existem diversas técnicas de tratamentos para a redução dos contaminantes ou inertização do cascalho de perfuração, entre os quais podemos citar: incineração, reinjeção, co-processamento na indústria do cimento, dessorção térmica ou

micro-ondas, biorremediação e fitorremediação e o descarte em aterros. Apesar de reduzirem os contaminantes e, em alguns casos, recuperarem parte do óleo, essas técnicas ainda são consideradas onerosas e sem solução ambiental adequada (PAGE *et al.*, 2003).

A técnica proposta para a inertização do cascalho de poços de petróleo utiliza misturas emulsionadas para reclassificação de resíduos sólidos perigosos ou não inertes, ou seja, a partir de misturas líquidas contendo substâncias tensoativas – que promovem a miscibilidade de óleo em água – são extraídas substâncias químicas de interesse (contaminantes) da matriz sólida para a líquida. A principal aplicação do processo é na indústria de petróleo, principalmente na exploração, onde o cascalho originado na perfuração de poços de petróleo podem ser inertizados e reclassificados, de modo que os resíduos, antes tratados termicamente, se transformem em matéria-prima e sejam aplicados na indústria de cerâmicas, base de estradas, terraplanagem (reaterro), com o objetivo de minimizar os impactos ambientais causados pelo transporte e destinação final dessas classes de materiais.

O processo consiste na solubilização dos contaminantes apolares (hidrocarbonetos) na matriz líquida aquosa (polar), utilizando-se substâncias tensoativas (surfactantes) para reduzir a tensão interfacial, formar micelas/emulsões que solubilizam e removem parte do óleo e da salinidade contida na matriz sólida (cascalho). A mistura de lavagem (emulsão) sofre processo de quebra de emulsão e separação entre água e óleo para recuperação dos hidrocarbonetos e reutilização da solução de lavagem no processo.

O processo inicia na alimentação de sólido (cascalho) em misturador para remoção dos contaminantes que apresentam menor resistência. O sólido é basculhado em peneira vibratória, submetida à vácuo, para realização da lavagem final e segregação entre os sólidos grossos (areia e pedregulhos) e finos (siltes e argila). Os sólidos grossos, retidos na peneira, são desaguados em leito para secagem solar, isentos de contaminantes, aptos ao reuso. Os sólidos finos, passantes na peneira, suspensos e dissolvidos na água drenada do sistema à vácuo, são separados posteriormente e desaguados em leitos para secagem solar. A corrente líquida é tratada para remoção da fase oleosa, adicionada quantidades de água e tensoativos para recompor as perdas e retornar ao processo como solução de lavagem.

É importante ressaltar o papel relevante de se estudar novas formas de tratamentos de resíduos de petróleo, visto que há uma grande demanda de geração de resíduos que necessitam se adequar aos limites ambientais determinados. O presente trabalho propõe um

processo de tratamento do cascalho menos oneroso e mais acessível para reclassificação dos resíduos gerados dentro dos limites aceitáveis pelo CONAMA.

2. ONJETIVOS

Esse estudo teve como objetivo conhecer o processo de inertização de cascalho proposto para posteriormente auxiliar na sua implantação e operação.

3. EMPRESA ENFIL S/A – CONTROLE AMBIENTAL

A Enfil S/A - Controle Ambiental é uma empresa especializada em soluções para o controle de poluição atmosférica, tratamento de águas e efluentes, cogeração de energia a partir do lixo, gestão de resíduos e recuperação de áreas contaminadas.

Fundada em 1994, a Enfil opera nos mercados nacional e internacional focada na concepção, fornecimento e instalação de equipamentos e sistemas nos regimes *turn-key*, EPC e DBOT.

Como empresa especialista no fornecimento de tecnologias para tratamento de água, efluentes líquidos e gestão de resíduos, a Enfil fornece alternativas que envolvem, além do fornecimento e implantação dos equipamentos, a operação e o investimento nos sistemas.

3.1. Tratamento de água e efluentes

A Enfil é um dos principais fornecedores de sistemas de tratamento de água e de efluentes no mercado brasileiro, com ampla experiência em processos físico-químicos e biológicos, para refinarias de petróleo, mineradoras, siderúrgicas, usinas de energia, dentre outros.

3.2. Controle da poluição atmosférica

A Enfil fornece filtros de mangas e precipitadores eletrostáticos para diferentes aplicações, tais como caldeiras a carvão e biomassa, fornos de pelotização, máquinas de sinterização, fornos de cal e cimento, entre outros. Sua longa experiência permite projetar e fabricar sistemas de pequeno porte até equipamentos para vazões de 2.000.000 m³/h.

Fornece ainda sistemas completos para dessulfurização de gases de combustão (FGD) para termelétricas, siderurgia, mineração, entre outros, utilizando diferentes processos (úmido, seco e semi-seco), o que permite a remoção de até 98% de óxido de enxofre.

3.3. Gestão de resíduos e gerenciamento de áreas contaminadas

A Enfil também atua na remediação de áreas contaminadas desde a avaliação preliminar até a proposição e operação de sistemas projetados para cada situação, *in situ* ou *ex situ*.

Complementarmente a empresa oferece toda a estrutura necessária para a gestão de resíduos, desde o inventário das fontes de geração até a destinação final.

3.4. Cogeração a partir do lixo

A Enfil e a Steinmuller Babcock Engineering – SBE da Alemanha mantêm um acordo de cooperação para fornecimento de plantas para aproveitamento térmico de Resíduos Sólidos Urbanos – RSU (Tecnologia WTE – *Waste-to-Energy*) no mercado brasileiro. A SBE é uma das líderes mundiais em tecnologias para o tratamento térmico de resíduos e para tratamento de gases, além de possuir tecnologia de queima em grelha rotativa ou móvel, selecionada de acordo com as características do RSU processado.

O conceito mais moderno de gestão de resíduos sólidos considera o aproveitamento energético de RSU como uma das alternativas mais adequadas na destinação de lixo doméstico. Atualmente, há mais de 800 plantas deste tipo no mundo, tratando mais de 300.000 ton/dia de RSU. A Enfil traz toda a expertise e experiência da SBE, na área de conversão térmica de lixo, ao mercado brasileiro.

3.5. Construções e montagens

A Enfil Construções e Montagens, opera realizando montagens eletromecânicas para diversos segmentos da economia nacional. Com pessoal altamente qualificado e sua grande versatilidade, a empresa, quanto se trata de novas soluções técnicas, se tornou uma das maiores empresas brasileiras no fornecimento de serviços em regime de *turn-key* e EPC.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os fundamentos da técnica de inertização de sólidos são baseados na química de solubilização de contaminantes (principalmente hidrocarbonetos apolares e sal) em solução aquosa, sob efeito químico da minimização das resistências entre as fases, por ação das substâncias tensoativas, somada ao efeito físico da atomização sob pressão e temperatura. A inertização é realizada através de atomização das soluções e misturas durante o processo, com objetivo de potencializar a ação dos tensoativos, por meio da remoção mecânica realizada por

bombas (pressão) e aumento de temperatura, que favorece a diminuição das resistências entre as fases e dissolução dos contaminantes e salinidade.

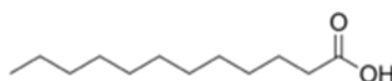
O processo de inertização de cascalho proposto ocorre em 3 (três) etapas que consistem na lavagem do cascalho com substâncias tensoativas (1ª etapa), separação granulométrica (2ª etapa) e secagem (3ª etapa), para remoção de água e contaminantes voláteis.

Os tensoativos são substâncias que, pela sua estrutura química e propriedades, adsorvem nas interfaces líquido-líquido, líquido-gás e sólido-líquido, reduzindo a tensão superficial. São moléculas anfifílicas, ou seja, moléculas que possuem em sua estrutura duas partes de polaridades diferentes associadas (MITTAL, 1979).

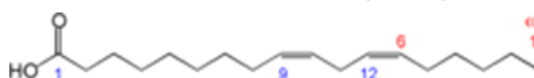
O produto remediador ambiental é chamado *Vegetable Oil Saponified* (VOS), tensoativo obtido a partir da saponificação dos óleos vegetais com base forte (KOH), de modo a obter o ácido láurico, monolauril, que são as principais gorduras presentes no coco, misturados ao ácido ricinoléico da mamona (ver Figura 1). A composição final do VOS são de 4,0% de ácidos cápricos, 31,0% de láurico, 11,9% mirístico, 6,3% palmítico, 2,0% esteárico, 5,0% oléico, 2,7% linoléico e 30,4% ricinoléico, todos inofensivos.

Figura 1 – Estrutura química do ácido láurico e do ácido ricinoléico.

- Ácido láurico (Ácido dodecanóico)



- Ácido ricinoléico (Ácido (9Z,12R)-12-Hydroxyoctadec-9-enoico)



Fonte: Autoria Própria.

Outro fundamento é o princípio de separação granulométrica que ocorre no decorrer dos estágios de inertização, onde as diferentes frações recorrem em eficiência de distintas inertizações. O cascalho da perfuração dos poços de petróleo é dividido durante o processo de inertização nas frações de pedregulhos (partículas maiores que 2 mm), areia (grossa/fina) e sólidos suspensos (silte e argila).

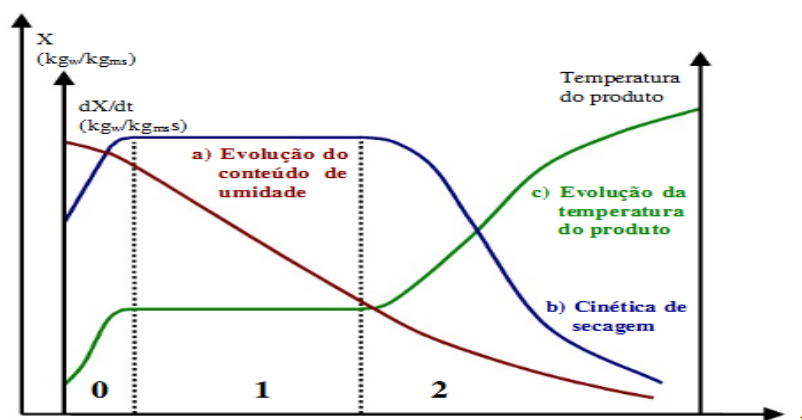
Após as etapas do processo de lavagem e separação granulométrica, o cascalho segue para a última etapa do processo de inertização, a secagem. Entendemos por secagem a operação unitária na qual retira-se água agregada a determinado produto sólido por vaporização térmica para uma fase gasosa insaturada. Esse mecanismo de vaporização térmica distingue a secagem de outros processos como a filtração e a centrifugação.

O processo de secagem é representado por três curvas que correspondem à variação da umidade ao longo do tempo, a variação da velocidade de perda de água (taxa de secagem) com o tempo e também com o teor de umidade do material.

A taxa de secagem diz respeito à velocidade com a qual ocorre a migração da umidade do interior do produto até a superfície e está relacionada diretamente ao estado físico das moléculas de água (na forma líquida ou vapor) e ao mecanismo de transferência de massa. Diz respeito, ainda, à velocidade de transferência da umidade da superfície do material sólido para a fase vapor, por área do material a ser seco (BERTELI, 2005).

PARK *et al.* (2007) em seu trabalho apresenta a evolução das transferências simultâneas de calor e de massa ao longo da operação de secagem faz com que esta seja dividida em três períodos, conforme representados na Figura 2.

Figura 2 – Comportamento das curvas de secagem / tempo



Fonte: PARK *et al.* (2007).

A curva (a) representa a diminuição do teor de água do produto durante a secagem, ou seja, é a curva obtida pesando-se o produto durante o processo, numa determinada condição de secagem. A curva (b) representa a velocidade de secagem do produto, taxa de variação do conteúdo de umidade do produto por tempo, dX/dt , isto é, é a curva obtida diferenciando a

curva (a). A curva (c) representa a variação da temperatura do produto durante a secagem e pode ser obtida medindo-se a temperatura do produto durante a secagem.

4. METODOLOGIA

O estudo do processo de inertização de cascalho de perfuração de poços de petróleo foi realizado na sede da empresa Enfil S/A – Controle Ambiental, na cidade de São Paulo – SP, especificamente na Divisão de Gestão de Resíduos e Remediação de Áreas Contaminadas.

O processo de inertização ocorrerá na Central de Resíduos de Estreito Desativada, situada no município de Assu, Estado do Rio Grande do Norte, o qual deverá receber os resíduos oriundos das atividades de perfuração de poços petrolíferos.

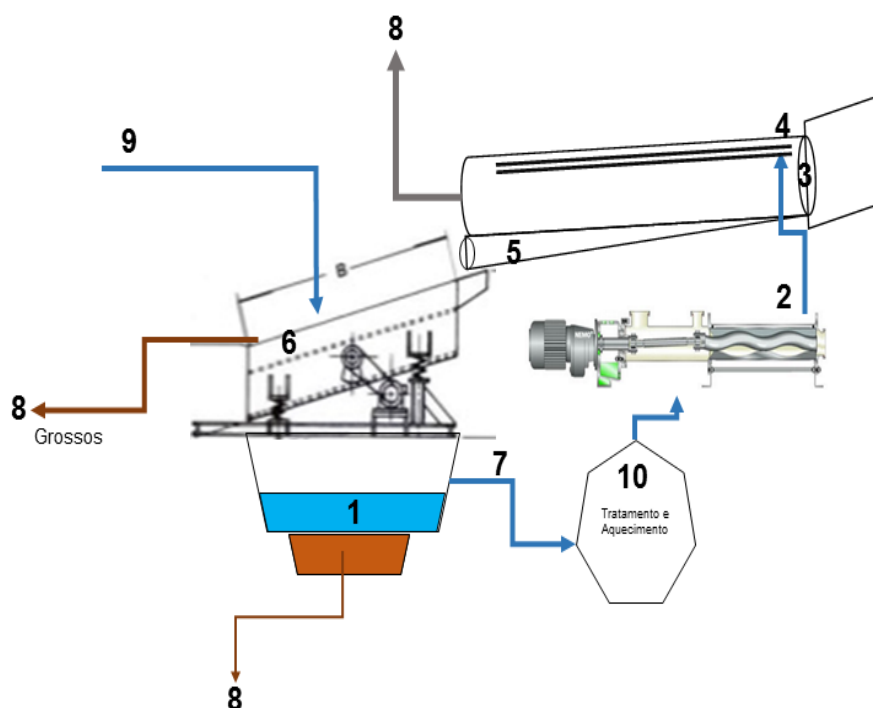
A metodologia utilizada para a elaboração do presente trabalho foi baseada em estudos e buscas nas bases nacionais e internacionais, além da análise de resultados de inúmeros testes de bancada com diferentes tensoativos iônicos e não iônicos, de base orgânica e sintética.

A tecnologia proposta consiste em solubilizar o óleo (apolar) impregnado no cascalho na matriz líquida aquosa (polar), utilizando-se tensoativos de origem vegetal (surfactantes) para reduzir a tensão interfacial, formar micelas/emulsões que solubilizam e removem boa parte óleo e salinidade contida na matriz sólida (cascalho). A mistura de lavagem (emulsão) sofre processo de quebra de emulsão e separação entre água e óleo para recuperação dos hidrocarbonetos e reutilização da solução de lavagem no processo.

O processo utilizará solução otimizada com tensoativos VOS em equipamento lavador, que consiste basicamente numa betoneira adaptada com sistema de bombeamento e separação entre fases capaz de manter agitação física para remoção contínua da fase oleosa livre e dissolvida, bem como redução da salinidade e adequação do material para posterior secagem solar.

O lavador será dotado de tanques auxiliares, bombas, válvulas e sistema de separação que manterá o ciclo da solução do tensoativo e, em posterior otimização, será capaz de devolver continuamente parte da fase líquida (salmoura) como insumo para operação e composição do fluido de perfuração.

Figura 3 – Processo de lavagem



Fonte: Enfil (2016).

1. Inicialmente o processo é caracterizado pelo preparo do volume inicial de solução do tensoativo a base de óleos vegetais, com concentração de 0,05% em massa do tensoativo no tanque da base da peneira vibratória;
2. Há recirculação de líquidos, caracterizada por bomba do tipo helicoidal (geremia), válvulas e tubulações que direcionam os líquidos da base da peneira vibratória para o tubo de lavagem do tambor rotativo;
3. Processo de mistura do sólido contaminado (alimentado mecanicamente) e solução aquosa do tensoativo, caracterizada por formação de lama em equipamento provido de tambor rotativo para separação granulométrica dos pedregulhos, que saem na extremidade oposta do tambor rotativo;
4. O tambor rotativo é dotado de tubo de lavagem, caracterizado pela injeção do líquido, vindo da bomba geremia, para destorroamento e formação de lama, que passa através dos orifícios do tambor;

5. A calha de coleta da lama está posicionada abaixo do tambor rotativo, caracterizada pelo direcionamento para a peneira vibratória de forma constante.
6. A separação das frações médias dos sólidos é caracterizada em peneira vibratória modificada, que recebe a lama da calha e separa nas frações retidas (areia grossa e fina) da mistura passante (sólidos em suspensão na mistura), essa última armazenada no tanque sob a peneira;
7. A mistura na base da peneira vibratória, volta para a recirculação de líquidos, caracterizada por bomba do tipo helicoidal (geremia), válvulas e tubulações que direcionam os líquidos da base da peneira vibratória, novamente para o tubo de lavagem do tambor rotativo;
8. O material sólido, caracterizadas por pedregulhos, areia (grossa/fina) e silte/argila, que saem dos processos de lavagem, apresentam umidade e são direcionadas para evaporação desta em leito de secagem solar.
9. Sistema de alta pressão para atomização da solução de make-up, injetada na parte superior da peneira vibratória, de modo a compensar as perdas por umidade dos materiais na saída.
10. Sistema de tratamento e aquecimento da mistura de lavagem, inserido a montante da bomba geremia e a jusante do tanque inferior da peneira vibratória.

4.1. Apresentação e descrição do equipamento piloto

O equipamento consta de um tambor rotativo que será alimentado mecanicamente com cascalho de perfuração e solução de inertização contendo tensoativo de base vegetal a uma concentração de 0,05% em massa, definida via testes experimentais.

O tambor contém orifícios por onde passará a lama formada com a solução de inertização, areia grossa e fina, silte e argila. Essas frações de menor faixa granulométrica são transportadas para a peneira vibratória a partir de uma calha instalada logo abaixo do tambor. Essa calha tem uma leve angulação, de modo a permitir que o cascalho seja encaminhado ao final do tubo por ação da gravidade. Nessa fase já haverá a separação do pedregulho, que ao chegar ao final do tubo tem o ponto de coleta.

Na peneira vibratória será separado as areias fina e grossa (que ficarão retidas na malha) do silte e argila (que passarão junto com a solução de inertização).

Além disso, o processo contém também um sistema de recirculação de líquido que

será efetuada por uma bomba do tipo helicoidal (geremia) e recirculará a solução da caixa inferior da peneira vibratória de volta ao início do processo.

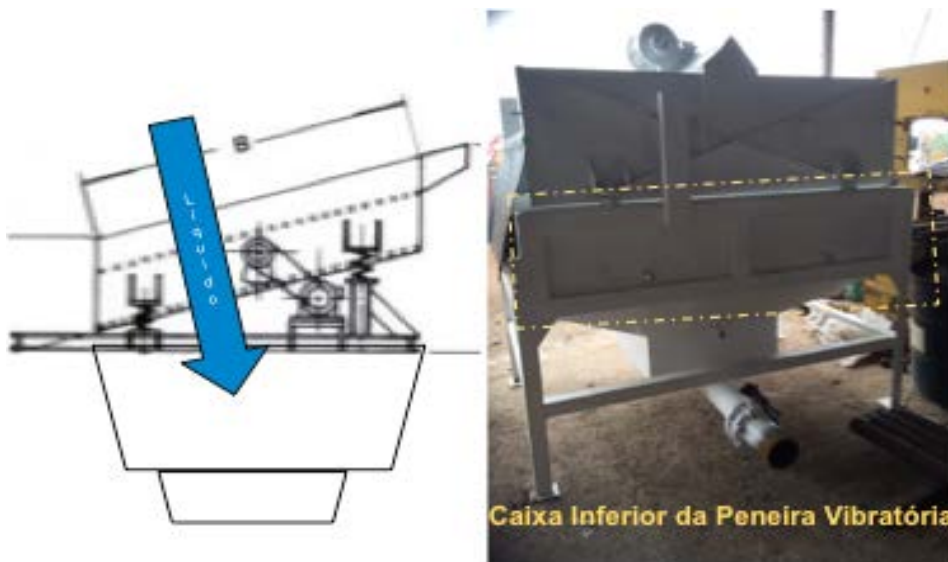
Nas Figuras 04-07 é possível observar o equipamento e seus componentes:

Figura 4 – Vistas laterais do equipamento



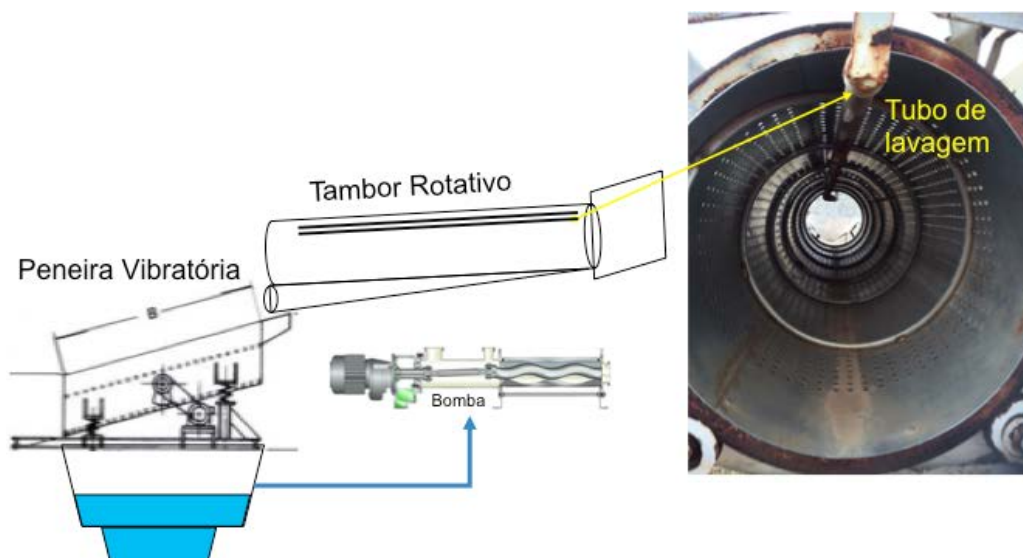
Fonte: Autoria Própria.

Figura 5 – Ilustração e foto da peneira vibratória de caixa inferior para mistura de inertização



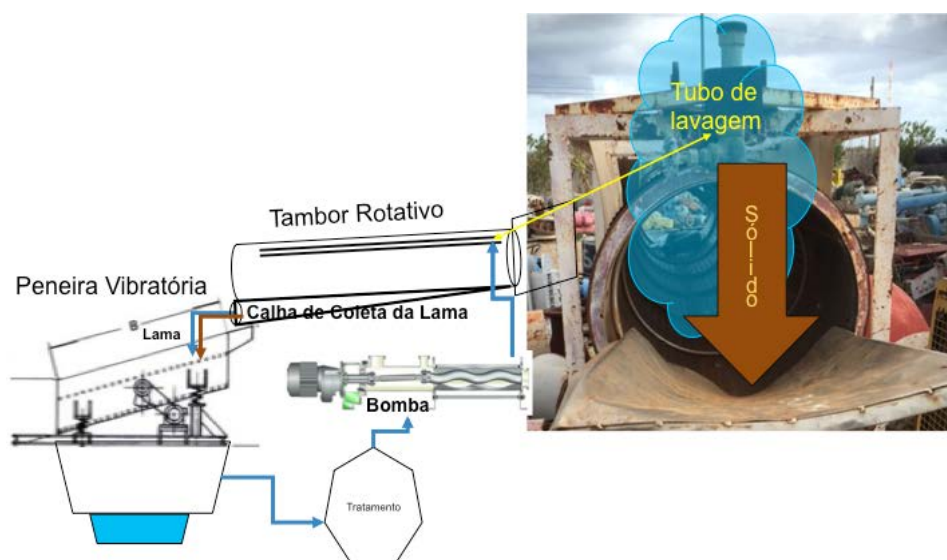
Fonte: Enfil (2016).

Figura 6 – Ilustração e foto do tambor rotativo e fluxograma com a peneira vibratória e o sistema de recirculação com bomba



Fonte: Enfil (2016).

Figura 7 – Alimentação de sólidos no tambor rotativo, a lama verte para uma peneira vibratória



Fonte: Enfil (2016).

4.2. Galpões de Secagem Solar

O processo de Secagem Solar é o principal diferencial desse trabalho. O material úmido será submetido aos galpões solares que tem como objetivo adequar a umidade e

homogeneizar a composição do conjunto de resíduos.

O secador solar de cascalhos de perfuração, ou túnel de secagem, possui formato de galpão com capacidade de secagem de resíduos para 200 toneladas diárias. Oferecendo ventilação natural e forçada, além de equipamentos para transporte e revolvimento do cascalho, inclusos no próprio túnel de secagem com área para carga e descarga dos resíduos. Pretende-se que a temperatura interna seja atendida em pelo menos 10 °C somados a temperatura externa. As Figuras 8 e 9 apresentam uma visão geral da infraestrutura dos galpões de secagem propostos.

A estrutura deve oferecer aproveitamento de pelo menos 80% da luz solar dentro do galpão, sendo de lona de polietileno transparente de 200 micras o material escolhido para envolvimento de estruturas laterais e cobertura, com estrutura metálica usada para sustentação, devendo seguir as orientações da Norma PETROBRAS N-293 – Fabricação e Montagem de Estruturas Metálicas. Toda estrutura voltada para secagem do cascalho possui uma área de 966 m².

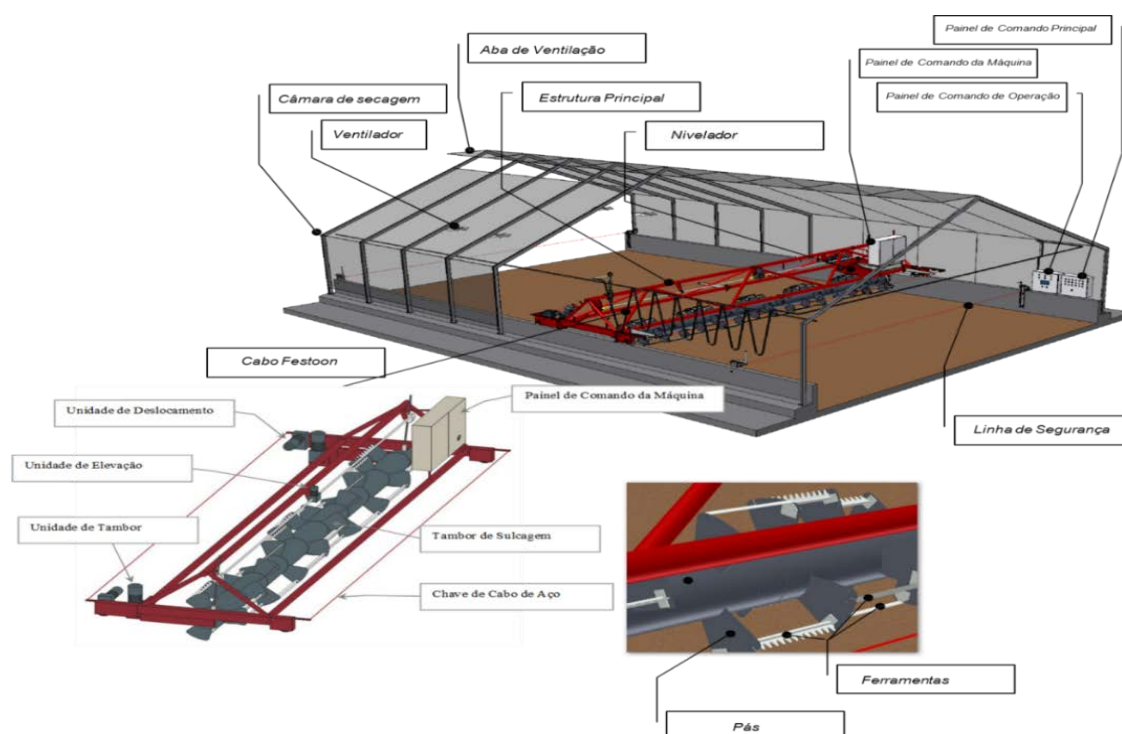
Para o armazenamento da carga seca em decorrência de possíveis problemas com a logística, o galpão deve possuir um anexo para armazenamento do cascalho, com capacidade para serem armazenadas 1.000 (um mil) toneladas. O galpão de armazenamento será também utilizado para caçambas basculantes, área coberta, com piso impermeável e resistente ao trânsito de máquinas pesadas.

Figura 8 – Exemplo de galpão de secagem solar



Fonte: Petrobras (2016).

Figura 9 – Visão geral do galpão de secagem solar e equipamentos



Fonte: Petrobras (2016).

As operações no galpão de secagem são iniciadas quando o caminhão basculante descarrega o resíduo lavado na parte da frente do galpão. O revolvedor se encontra elevado na outra extremidade do galpão. Após a saída do caminhão basculante, o revolvedor é acionado simultaneamente com os ventiladores. O operador desloca automaticamente o revolvedor para a parte da frente do galpão, onde o resíduo será basculado e transferido simultaneamente para os fundos do galpão de secagem. Chegando ao final do galpão, pretende-se que o resíduo já esteja com sua umidade final atingida. O resíduo desidratado é então transferido para uma esteira inclinada que o encaminhará para o galpão de armazenamento anexo ao galpão de secagem.

O processo de secagem do cascalho de perfuração ocorre de tal forma a possuir uma fluidez no decorrer das atividades. A Figura 10 apresenta resumidamente o processo.

Figura 10 – Fluxograma do processo



Fonte: Petrobras (2016).

4.2.1 Secagem

A secagem do cascalho no túnel de secagem inicia-se quando o resíduo é depositado no leito de secagem, e o revolvedor e os ventiladores têm suas atividades iniciadas.

O revolvedor tem de se encontrar elevado na extremidade oposta ao recebimento da carga, para que sua integridade e seu movimento seja livre e, através do comando CLP (Controlador Lógico Programável), dado pelo operador do túnel de secagem, o equipamento deslocará a carga úmida, iniciando, assim, o seu curso de rotação.

Simultaneamente, também ao comando do CLP, os ventiladores serão acionados para que a ventilação seja ofertada ao resíduo úmido que, junto à ação do revolvedor, facilitarão o transporte e retirada das moléculas de água contidas no resíduo.

Estima-se que o tempo de secagem seja de 550 minutos, para difusividade média em 3 mm de $4,531 \times 10^{-08} \text{ m}^2/\text{s}$, para umidade final em base seca de aproximadamente 25%. Com a umidade final definida em base seca, com percentual de 25%, pretende-se que a quantidade gerada de poeira possa ser reduzida.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os principais resultados que serão discutidos abaixo correspondem ao teor de salinidade presente no cascalho e ao potencial de remoção de NaCl, a partir da lavagem com

a solução saponifica e apenas com água. Também foram analisados o potencial de remoção de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos, as faixas granulométricas das amostras, o teor de carbono orgânico total e os resultados experimentais de secagem do cascalho.

5.1 Resultados de NaCl e HPA's

Durante os testes de bancada, para analisar a salinidade do cascalho de perfuração, foi elaborada uma curva de correlações entre o teor de NaCl (ver Figura 11) e a condutividade para que se tornasse possível, de forma empírica, o teor de NaCl presente em cada etapa de inertização.

As concentrações de NaCl no solo e suas respectivas condutividades, que foram utilizadas para a construção da curva e para a determinação da equação empírica, podem ser observadas na tabela abaixo:

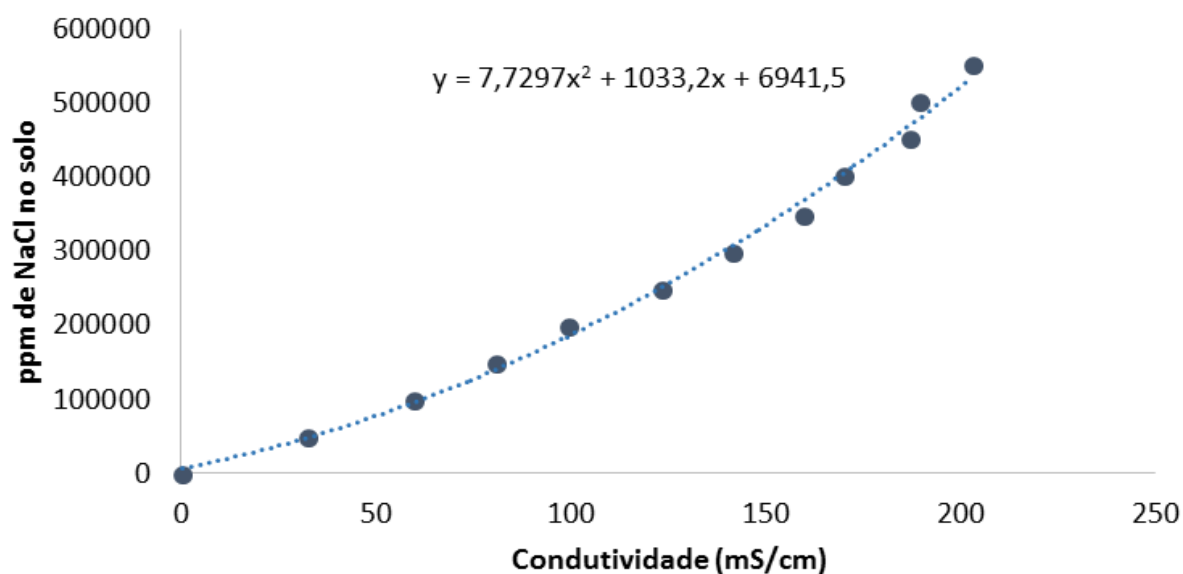
Tabela 1 – Concentrações de NaCl e suas respectivas condutividades

Condutividade	Concentração de NaCl no solo (ppm)
0,4108	0
32,5	50000
59,68	100000
81,22	150000
99,31	200000
123,5	250000
141,5	300000
159,6	350000
170,1	400000
186,8	450000
189,5	500000
202,9	550000

Fonte: Enfil (2016).

A curva de correlações e sua equação podem ser observadas na Figura 11.

Figura 11 – Curva de correlações “Condutividade x [NaCl]”

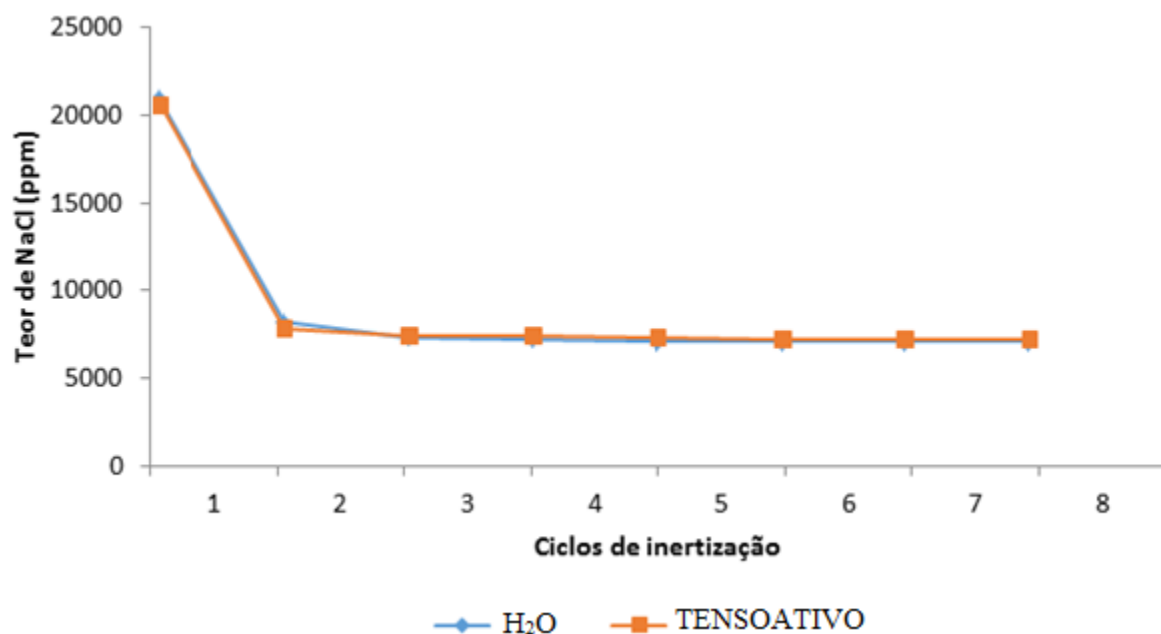


Fonte: Autoria Própria.

Após a elaboração da curva foi realizada uma sequência de ciclos de inertização com o cascalho, adicionando sempre uma nova solução ao cascalho que já havia passado pelo processo até que chegasse a oito ciclos. O objetivo desse procedimento foi observar o comportamento do cascalho no decorrer dos ciclos.

O comportamento da inertização com água e com a solução de tensoativos utilizada nos testes do equipamento piloto pode ser observado na Figura 12, que indica o teor de NaCl, em ppm, em cada um dos oito ciclos.

Figura 12 – Teor de NaCl (ppm) no decorrer de 8 ciclos de inertização



Fonte: Autoria Própria.

A partir do gráfico acima é possível concluir que não há necessidade de mais de um ciclo de inertização, mostrando que com apenas um ciclo já houve uma redução de aproximadamente 62% no teor de NaCl e que a partir do segundo ciclo já não há mais redução significativa no mesmo.

Após determinar que apenas um ciclo é suficiente para a adequação do teor de NaCl foram realizados experimentos para um ciclo de inertização com diversas soluções aquosas em maior escala para que se pudesse realizar a análise dos Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPA's). Além disso, o cascalho bruto foi também submetido à análise HPA's. Os resultados da inertização com água e com o tensoativo, à base de saponificação de óleo vegetal, podem ser observados na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2 – Percentual de remoção dos HPA's com a inertização

PARÂMETRO	% DE REMOÇÃO ÁGUA EM RELAÇÃO AO BRUTO	% DE REMOÇÃO TENSOATIVO EM RELAÇÃO AO BRUTO
Acenafteno	99,28%	45,68%
Acenaftileno	Valores abaixo do limite de detecção	Valores abaixo do limite de detecção
Antraceno	Valores abaixo do limite de detecção	Valores abaixo do limite de detecção
Benzo(a)antraceno	93,94%	93,94%
Benzo(a)pireno	Valores abaixo do limite de detecção	Valores abaixo do limite de detecção
Benzo(b)fluoranteno	Valores abaixo do limite de detecção	Valores abaixo do limite de detecção
Benzo(g,h,i)perileno	Valores abaixo do limite de detecção	Valores abaixo do limite de detecção
Benzo(k)fluoranteno	Valores abaixo do limite de detecção	Valores abaixo do limite de detecção
Criseno	70,16%	59,68%
Dibenzo(a,h)antraceno	Valores abaixo do limite de detecção	Valores abaixo do limite de detecção
Fenantreno	92,46%	61,07%
Fluoranteno	94,59%	94,59%
Fluoreno	98,82%	42,60%
Indeno(1,2,3cd)pireno	Valores abaixo do limite de detecção	Valores abaixo do limite de detecção
Naftaleno	-71,43%	95,24%
Pireno	Valores abaixo do limite de detecção	Valores abaixo do limite de detecção

Fonte: Enfil (2016).

Na Tabela 02, nos casos onde está indicado como “valores abaixo do limite de detecção”, são casos onde os parâmetros estavam abaixo do limite de detecção tanto na amostra de cascalho bruto, quanto na amostra inertizada.

Além disso, para o caso do naftaleno em inertização com água que apresenta um percentual negativo de remoção, é porque nesse caso teve um aumento na quantidade desse parâmetro com relação à amostra bruta de cascalho que foi utilizada como referência. Exceto no caso do naftaleno na inertização com água, todos os parâmetros apresentaram redução significativa, com percentuais de remoção variando.

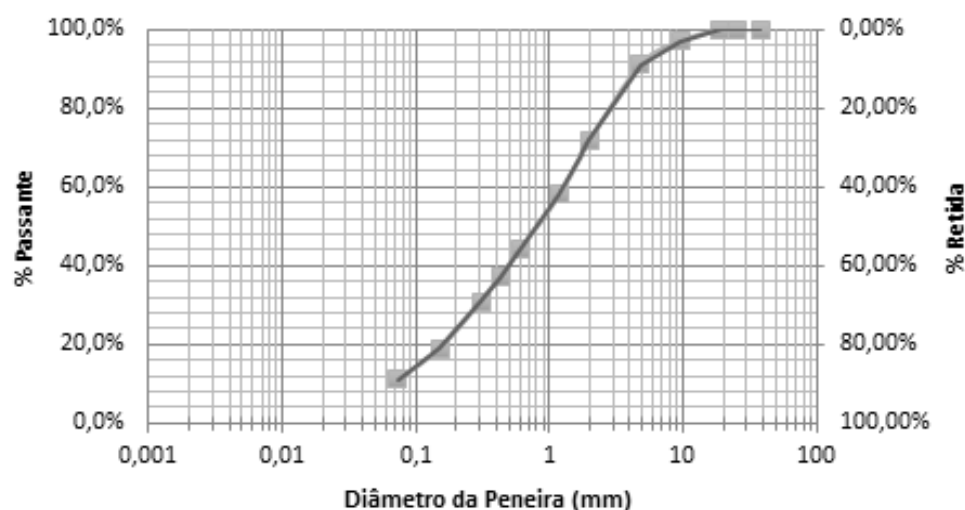
5.2 Resultados de granulometria e Teor de Carbono Orgânico Total – TOC

O ensaio de granulometria é utilizado para determinar a distribuição granulométrica do solo, ou em outras palavras, a percentagem em peso que cada faixa especificada de tamanho de grãos representa na massa seca total utilizada para o ensaio.

O objetivo primordial desse ensaio de granulometria é obter a curva granulométrica do solo a ser utilizado. Através da curva granulométrica pode-se estimar as percentagens (em relação ao peso seco total), correspondentes a cada fração granulométrica do solo.

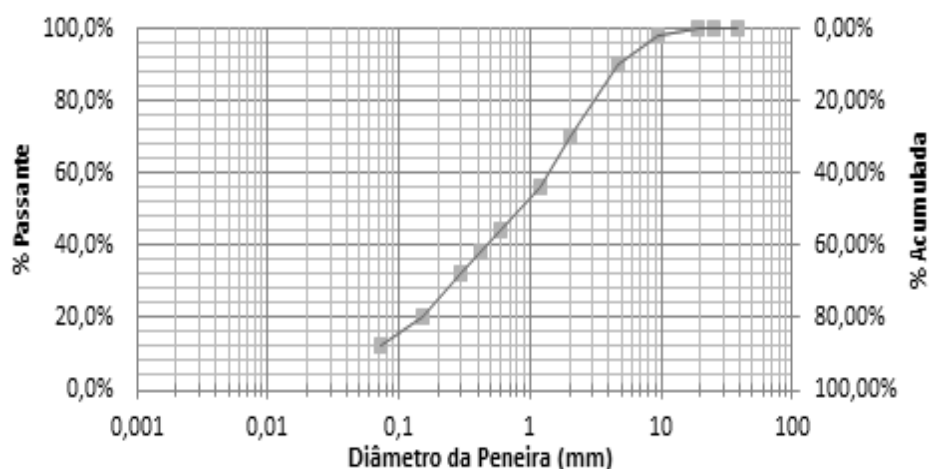
Com os resultados obtidos no ensaio, foi possível a construção das curvas de distribuição granulométrica das amostras de solo 1 e 2, apresentadas nas Figuras 13 e 14, que possuem fundamental importância na caracterização geotécnica do solo.

Figura 13 – Curva Granulométrica - Amostra 1



Fonte: Enfil (2016).

Figura 14 – Curva Granulométrica - Amostra 2



Fonte: Enfil (2016).

De acordo com as curvas granulométricas foi possível caracterizar o solo utilizado. Percebe-se, então, que o solo é composto por, aproximadamente, 79% de areia. Visto isso, foram escolhidas 2 faixas granulométricas a serem trabalhadas que representam o solo da região petrolífera do Rio Grande do Norte, uma correspondendo a areia média com diâmetro de 0,6 mm, ou *mesh* de 30 e outra à areia fina com diâmetro de 0,15 mm, ou *mesh* de 100.

Seguem abaixo as tabelas de classificação tipológica dos solos coletados, de acordo com a porcentagem retida nas peneiras.

Tabela 3 – Classificação da amostra de Solo 1.

Pedregulho	8,99%
Areia Grossa	33,09%
Areia Média	27,21%
Areia Fina	19,61%
Silte + Argila	11,10%

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 4 – Classificação da amostra de Solo 2

Pedregulho	9,88%
Areia Grossa	33,91%
Areia Média	23,90%
Areia Fina	20,20%
Silte + Argila	12,11%

Fonte: Autoria Própria.

Para os resultados parciais de Teor de Carbono Orgânico (TOC) foram analisadas amostras com *mesh* 30 e 100, com contaminação de 50% e sem contaminação.

Para análise da eficiência foi comparada a taxa de teor de carbono entre as lavagens com o tensoativo e as lavagens apenas com água. As lavagens apenas com água das amostras de areia grossa e fina (*mesh* 30 e 50, respectivamente) tiveram uma taxa de teor de carbono orgânico de 1,4% e 1,8%, respectivamente.

Posto isso, as melhores eficiências de lavagem para as amostras de *mesh* 30 e contaminação de 50% foram obtidas a partir das amostras com contração 0,01% de VOS, as quais tiveram uma média de teor de carbono orgânico de 0,9%. Para as amostras de *mesh* 50 a solução de lavagem mais eficiente foi a de concentração de 0,01% de VOS, apresentando média de teor de carbono orgânico de 2,0%.

Visto isso e observando as Tabelas 5 e 6, percebe-se, então, que concentrações maiores de tensoativo, ao invés de otimizarem a eficiência de lavagem, acabam por agregarem ao teor de carbono orgânico da amostra, assim reduzindo sua eficiência.

Tabela 5 – %TOC para amostras de #30 (Areia Grossa) limpa e contaminada com 50% de óleo

Contaminação	Cascalho #30 (0%)	50% Res. Petroleo
Base Seca (sem lavagem)	3,00%	9,80%
Só H2O	1,40%	1,60%
Óleo Vegetal Saponificado (comercial)		
1%	-	2,90%
0,10%	-	2,30%
0,01%	-	0,93%

Fonte: Enfil (2016).

Tabela 6 – %TOC para amostras de #50 (Areia Fina) limpa e contaminada com 50% de óleo.

Contaminação	Cascalho #50 (0%)	50% Res. Petróleo
Base Seca (sem lavagem)	2,70%	7,40%
Só H ₂ O	1,80%	1,50%
Óleo Vegetal Saponificado (comercial)		
1%	-	2,30%
0,10%	-	2,10%
0,01%	-	2,00%

Fonte: Enfil (2016).

5.3 Resultados de Experimentais de Secagem

Para as definições de projeto, as diretrizes de secagem estabelecidas segundo a literatura para estabelecimento dos parâmetros foram seguidas seguindo as seguintes fórmulas:

- Base seca (Xbs) - Em relação à massa seca do produto.

$$Xbs = \frac{Mw}{Ms}$$

- Base úmida (Xbu) - Em relação á base úmida do produto.

$$Xbu (\%) = \frac{Mw}{Mt} \cdot 100$$

- Base seca (Xbs) para base úmida (Xbu).

$$Xbs (\%) = \frac{Xbu (\%)}{100 - Xbu (\%)} \cdot 100$$

- Base úmida (Xbu) para base seca (Xbs).

$$Xbu (\%) = \frac{Xbs (\%)}{100 + Xbs (\%)} \cdot 100$$

onde: Mw: Massa de água (g), Ms: Massa seca (g), Mt: Massa total (g), Xbs: Umidade base seca (%), e Xbu: Umidade base úmida (%).

Após a determinação dos valores, os valores foram tabulados no programa STATISTICA[®], e então encontrada a constante “K” para cada experimento, inserindo o modelo de Fick, através da equação simplificada.

$$Y = \frac{\bar{X} - Xeq}{Xo - Xeq} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i + 1)^2} \cdot \exp \left[-(2i + 1)^2 \pi^2 Def \frac{t}{4L^2} \right]$$

em que: Y = adimensional de teor de água (adimensional), X = teor de água média (kg_w/kg_{ms}), X_{eq} = teor de água de equilíbrio (kg_w/kg_{ms}), X_o = teor de água no instante inicial (kg_w/kg_{ms}), i = número de termos de série, t = tempo (s), Def = difusividade efetiva (m²/s), L = comprimento característico, semi-espessura da amostra (m).

Feita a aproximação em cinco termos, do modelo para placa plana, da equação acima, foi inserida no *Software* a seguinte equação:

$$\frac{\left(8 * \left(\frac{1}{(81 * e^{(81 * K * \pi^2 * T)})} + \frac{1}{(49 * e^{(49 * K * \pi^2 * T)})} + \frac{1}{(25 * e^{(25 * K * \pi^2 * T)})} + \frac{1}{(9 * e^{(9 * K * \pi^2 * T)})} + e^{-(K * \pi^2 * T)} \right) \right)}{\pi^2}$$

Quando determinado K, a difusividade efetiva é dita por:

$$Def = \frac{4.K.L^2}{\pi^2}$$

O coeficiente de difusão (Def) é uma difusividade efetiva que engloba os efeitos de todos os fenômenos que podem intervir sobre a migração da água. E seu valor é sempre obtido pelo ajuste de valores experimentais.

Portanto, chegou-se aos seguintes resultados:

Tabela 7 – Tabela de resultados experimentais

	Experimento	X _{bs} (kg/kg)	K	Def (m ² /s)	R ²
42 °C	1	2,49	0,000232	1,41E-07	97%
	2	2,2	0,000469	1,60E-07	93%
	3	2,04	0,000477	7,24E-08	95%
38 °C	4	2,45	0,000366	2,23E-07	97%
	5	2,16	0,000357	1,22E-07	96%
	6	1,93	0,000288	4,38E-07	91%
32 °C	7	2,4	0,000376	2,29E-07	95%
	8	2,35	0,000324	1,11E-07	95%
	9	2,12	0,000298	4,53E-08	96%

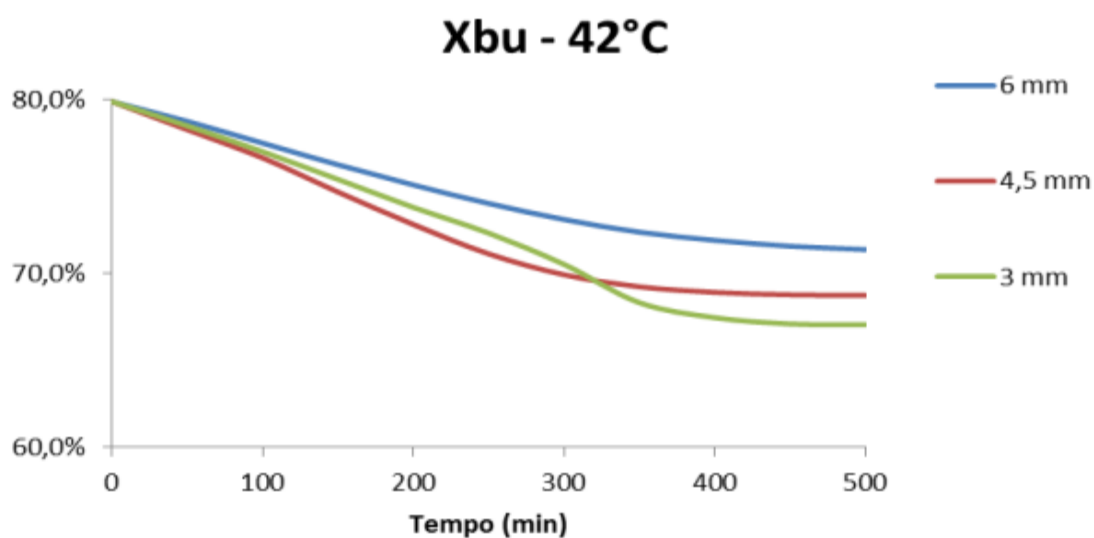
Fonte: Autoria Própria.

Para o dimensionamento do galpão de secagem solar foram adotados os valores mais conservativos obtidos Tabela 7, temperatura de 32 °C e a Difusividade Efetiva de 4,53x10⁻⁸ (m²/s), considerando assim as piores condições climatológicas para o processo de secagem.

A simulação de secagem do cascalho levou em consideração os dados climatológicos da região próxima de Mossoró/RN, conforme apresentados nas Figuras 15-17.

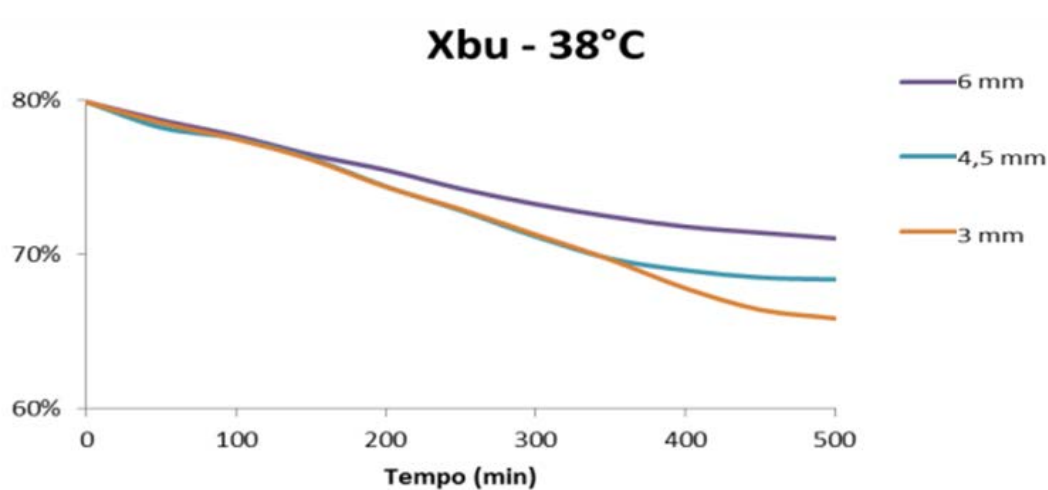
Os gráficos abaixo correlacionam o percentual de umidade do resíduo com o tempo necessário para a secagem de acordo com a granulometria da partícula (3 mm, 4,5 mm e 6 mm). É importante ressaltar que a temperatura dentro do galpão de secagem será elevada em pelo menos 10 °C em relação a temperatura ambiente.

Figura 15 – Curva de Secagem para 42 °C



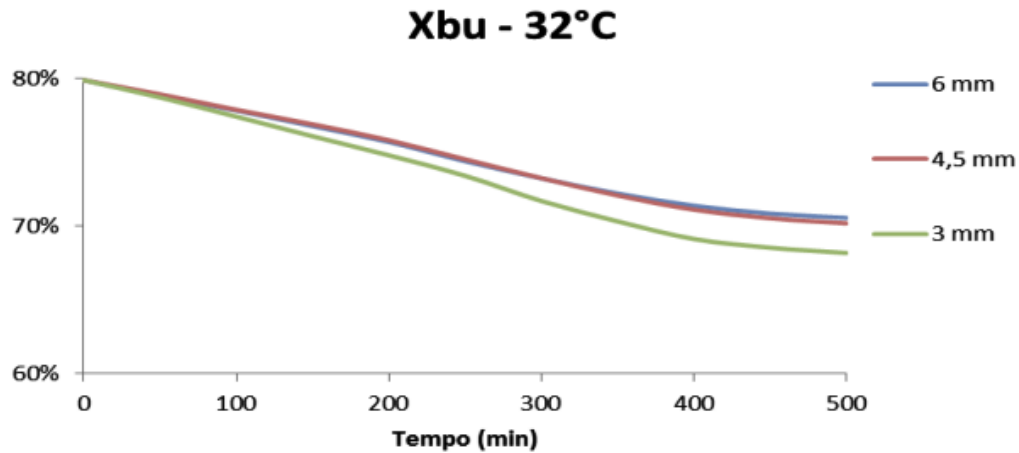
Fonte: Enfil (2016).

Figura 16 – Curva de Secagem para 38 °C



Fonte: Enfil (2016).

Figura 17 – Curva de Secagem para 32 °C



Fonte: Enfil (2016).

6. CONCLUSÕES

Com base na descrição do processo de inertização, os resíduos perigosos e não inertes poderão ser reclassificados e passarem a ser resíduos inertes. Sendo assim, o material pode ser considerado como solo, considerando que se trata de um conjunto de minerais (rocha triturada) que foi modificado e não interage com o meio.

A principal vantagem que podemos citar na inertização de cascalho de perfuração é, sem dúvidas, a redução dos custos. Mas, além disso, existem também a questão de ser um processo sustentável.

Em relação aos experimentos, podemos concluir que para as concentrações de tensoativos igual ou superior a 1% em massa não apresentam resultados satisfatórios para o processo de lavagem, isso pode ser explicado pelo fato de que quando aumentamos a concentração do sabão na solução ocorre o favorecimento de formação de espuma que dificulta o processo de lavagem.

Com relação à eficiência da lavagem em relação ao tamanho da amostra, concluímos que as amostras de maior granulometria (areia grossa) apresentam melhores resultados para o processo de descontaminação por petróleo em comparação com as amostras de menor granulometria (areia fina).

Desta forma, um material que requeria um alto custo para ser co-processado e destinado, sem muita utilidade, será inertizado com um menor custo e poderá ser utilizado

como matéria-prima, podendo ser aplicado em estradas, como reaterro na terraplanagem, na indústria de cerâmicas, dentre outros. Essa é a proposta do presente trabalho.

7. SUGESTÕES PARA A MELHORIA DO PROCESSO

Na participação do desenvolvimento e melhoria do processo proposto foram sugeridos novos estudos com diferentes tensoativos no intuito de se obter resultados mais eficientes para o processo de lavagem. Foram sugeridos também testes para se verificar a influência da temperatura da solução tensoativa na eficiência da lavagem do cascalho. A temperatura da solução de lavagem poderia ser controlada facilmente a partir de uma resistência térmica localizada na caixa inferior da peneira vibratória.

Após a implantação do projeto e inicialização de suas operações, deve-se obter dados reais do processo para fins de cálculo de balanço de massa e energia e posterior otimização do processo.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALL, A. S.; STEWART, R. J.; SCHLIEPHAKE, K.; A review of the current options for the treatment and safe disposal of drill cuttings. Journal Waste Management & Research, v.30, p.457-473, 2011.
- BERTELI, Michele Nehemy. Estudo Comparativo de Processos de Secagem de Sólidos Granulados com e Sem Assistência de Microondas. 114p. Dissertação para Título de mestrado.Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia de Alimentos.Campinas, 2005.
- MITTAL, K. L. : Solution Chemistry of Surfactants, 1 ed., New York: Plenum Press, 1979. V.1
- PAGE. P. W.; GREAVES. Chris.; LAWSON. R.; HAYES. Sean.; BOYLE, F. Options for the Recycling of Drill Cuttings. SPE Publication 80583. SPE/EPA/DOE Exploration and Production Environmental conference held in San Antonio, Texas, U.S.A.,1012 March 2003.
- PARK, K. J. ; ANTONIO, G. C. ; Oliveira, R. A. ; PARK, K. J. B., 2007. Conceitos de processo e equipamentos de secagem. CTEA – UNICAMP. Campinas.