



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**CARACTERIZAÇÃO DE CASCALHO E LAMA DE
PERFURAÇÃO AO LONGO DO PROCESSO DE CONTROLE
DE SÓLIDOS EM SONDAS DE PETRÓLEO E GÁS**

Uberlândia – MG
2010



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



Caracterização de cascalho e lama de perfuração ao longo do processo de controle de sólidos em sondas de petróleo e gás

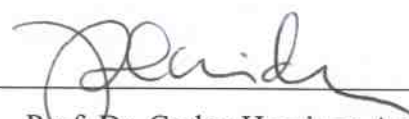
Marina Seixas Pereira

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração de Desenvolvimento de Processos Químicos.

Uberlândia – MG
2010

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA, EM 14 /12 /2010

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde

Orientador (PPG-EQ/UFU)



Prof. Dr. Cláudio Roberto Duarte

(PPG-EQ/UFU)



Prof. Dr. Fábio de Oliveira Arouca

(PPG-EQ/UFU)



Prof. Dr. Fábio de Assis Ressel Pereira

(DECOM/CEUNES/UFES)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG - Brasil

P436c Pereira, Marina Seixas, 1985-
Caracterização de cascalho e lama de perfuração ao longo do processo
de controle de sólidos em sondas de petróleo e gás [manuscrito] / Marina
Seixas Pereira. - 2010.
129 f. : il.

Orientador: Carlos Henrique Ataíde.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia. Progra-
ma de Pós-Graduação em Engenharia Química.
Inclui bibliografia.

I. Processos químicos - Teses. 2. Separação (Tecnologia) - Teses. I.
Ataíde, Carlos Henrique. II. Universidade Federal de Uberlândia. Progra-
ma de Pós-Graduação em Engenharia Química. III. Título.

CDU: 66.065.5

Ao Pai que me amou primeiro.

Ao Filho que me redimiu.

Ao Espírito Santo que guia os meus caminhos.

Aos meus amados pais, irmã, sobrinha e noivo.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que, pela sua graça, me capacitou a cumprir mais essa etapa na minha vida e com seu imensurável amor sempre traz a existência os meus sonhos.

Aos meus incondicionalmente amados pais, exemplos de caráter, que desde tenra idade me incentivam em prosseguir no caminho da busca pelo conhecimento.

Ao meu amor André, exemplo de perseverança e ousadia, por seu constante incentivo e motivação.

À minha irmã Pâmela e sobrinha Bárbara pelos momentos de ternura e afeto proporcionados.

À Fernanda por sua amizade e companheirismo de longa data.

Ao meu orientador Carlos Henrique Ataíde pela dedicação, incentivo, paciência, profissionalismo e amizade durante a realização deste trabalho.

Aos amigos Curt e Karen que muito me ajudaram no desenvolvimento e conclusão deste projeto e pelas horas de agradável convivência.

Aos funcionários da Faculdade de Engenharia Química, em especial, Cléo, Lara, Roberta, Silvino e José Henrique, que muito me ajudaram no decorrer deste curso.

Ao programa e ao corpo docente da Pós-Graduação em Engenharia Química da UFU, em especial, aos professores Carlos Henrique Ataíde, Marcos Antônio de Souza Barrozo e Carla Eponina Hori, por confiarem e acreditarem em mim e no meu trabalho para o doutorado direto.

À CAPES e à PETROBRAS por viabilizarem os recursos necessários ao desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

Enfim, a todos que, de uma forma ou de outra, estiveram presentes em minha vida e foram, com certeza, essenciais para a execução e conclusão desta dissertação.

“Os que confiam no Senhor são como o monte Sião,
que não se abala, mas permanece firme para sempre”.

Salmo 125 :1

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	v
LISTA DE SÍMBOLOS	vii
TERMINOLOGIA	ix
RESUMO.....	xi
ABSTRACT	xiii
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Fluidos de perfuração	3
2.1.1 Tipos de fluido de perfuração	4
2.1.2 Funções dos fluidos de perfuração	8
2.1.3 Propriedades importantes dos fluidos de perfuração	11
2.1.4 Alguns dados a respeito da geração de cascalho e consumo de fluido.....	12
2.2 A questão ambiental quanto ao descarte de sólidos de perfuração.....	13
2.3 Perspectivas quanto ao sistema de limpeza do cascalho	15
2.3.1 Dessorção térmica.....	17
2.3.2 Dessorção termomecânica	19
2.3.3 Microondas	21
2.3.4 Extração supercrítica	24
2.3.5 Secagem a vácuo	25
2.4 Fundamentos teóricos	26
2.4.1 Reologia.....	26
2.4.2 Granulometria	29
2.5 Panorama do secador de cascalho	32
CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
3.1 Controle de sólidos em sondas de perfuração de petróleo e gás	37
3.1.1 Peneiras vibratórias.....	38

3.1.2 Hidrociclones	39
3.1.3 <i>Mud Cleaner</i>	41
3.1.4 Centrífuga decantadora	42
3.1.5 Secador de cascalho	43
3.1.6 Fluido recuperado no secador de cascalho.....	44
3.2 Amostragem	44
3.3 Fluido de perfuração utilizado	46
3.4 Concentrações	47
3.5 Massa específica dos sólidos.....	48
3.6 Reologia da lama de perfuração	49
3.7 Granulometria dos sólidos de perfuração.....	51
3.8 Secador de cascalho	52
3.8.1 Telas	53
3.8.2 Raspadores	54
3.8.3 Rotor.....	55
3.8.4 Descarga de sólidos.....	55
3.8.5 Diferentes modelos da centrífuga Verti-G da M-I Swaco	56
3.8.6 Diferentes tipos de alimentação do secador de cascalho	57
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.1 Concentrações	59
4.2 Massa específica dos sólidos.....	61
4.3 Reologia da lama de perfuração	62
4.3.1 Reogramas.....	62
4.3.2 Ajuste dos dados segundo modelos reológicos.....	65
4.3.3 Viscosidade aparente.....	70
4.3.4 Tixotropia.....	72
4.4 Granulometria dos sólidos de perfuração.....	77
4.4.1 Distribuição granulométrica na forma acumulativa.....	77
4.4.2 Ajuste dos dados segundo modelos de distribuição granulométrica acumulativa..	80
4.4.3 Distribuição granulométrica na forma de frequência.....	83
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES E SUGESTÕES	85

5.1	Conclusões.....	85
5.2	Sugestões	86
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
	APÊNDICE A	95
	APÊNDICE B.....	115

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Fluido de perfuração sintético que retorna do poço sendo perfurado.....	4
Figura 2.2 - Efeito de dispersão de cascalho com fluido base aquosa (a) e não aquosa (b).....	7
Figura 2.3 - Fluido de perfuração sendo injetado dentro da coluna.	10
Figura 2.4 - Unidade de dessorção térmica convencional.	18
Figura 2.5 - Unidade de dessorção termomecânica (vista frontal e lateral).	20
Figura 2.6 - Processo de dessorção termomecânica (TCC ^{RM}).....	21
Figura 2.7 - Processo de utilização de microondas na limpeza de cascalho.	21
Figura 2.8 - Sistema de secagem a vácuo.	26
Figura 2.9 - Comportamento reológico de fluidos independentes do tempo.....	27
Figura 2.10 - Comportamento reológico de fluidos dependentes do tempo.....	28
Figura 2.11 - Curvas de distribuição granulométrica segundo o modelo RRB.....	31
Figura 2.12 - Curva de distribuição granulométrica segundo o modelo Sigmóide.	31
Figura 2.13 - Curvas de distribuição granulométrica segundo o modelo GGS.....	32
Figura 2.14 - Comparação entre o cascalho molhado (a) - 12% - e seco (b) - 3%.....	34
Figura 2.15 - Comparação entre o teor de fluido no cascalho das peneiras e do secador.	35
Figura 3.1 - <i>Mud Cleaner</i>	41
Figura 3.2 - Centrífuga decantadora.	42
Figura 3.3 - Secador de cascalho.	43
Figura 3.4 - Fluxograma do sistema de controle de sólidos.	45
Figura 3.5 - Fluxo de material e estrutura do secador de cascalho.....	52
Figura 3.6 - Tela de 20 mesh (a), abertura vertical da tela (b) e suporte da tela (c).....	54
Figura 3.7 - Raspadores.	54
Figura 3.8 - Cone e rotor do secador de cascalho.....	55
Figura 3.9 - Evolução dos modelos de secadores de cascalho da M-I Swaco.....	56

Figura 4.1 - Reogramas das sondas 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d) e 5(e).	63
Figura 4.2 - Gráficos dos modelos reológicos em comparação com os dados experimentais do fluido reserva (a) e fluido recuperado no secador de cascalho (b) da sonda 4.	66
Figura 4.3 - Viscosidade aparente x taxa de deformação: sondas 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d) e 5 (e).	71
Figura 4.4 - Variação da viscosidade aparente do fluido de perfuração com o tempo de cisalhamento: <i>underflow</i> (a) e <i>overflow</i> (b) do dessiltador da sonda 3.....	73
Figura 4.5 - Curva de fluxo do fluido de perfuração com e sem a quebra da estrutura gel das correntes da sonda 4: fluido reserva (a), fluido puro (b) e fluido recuperado no secador (c).....	74
Figura 4.6 - Curva de fluxo do fluido de perfuração com e sem a quebra da estrutura gel das correntes da sonda 3: alimentação (a), <i>overflow</i> (b) e <i>underflow</i> (c) do dessiltador, fluido reserva (d) e fluido puro (e).....	75
Figura 4.7 - Curva de fluxo do fluido de perfuração com e sem a quebra da estrutura gel das correntes da sonda 5: alimentação (a), <i>overflow</i> (b) e <i>underflow</i> (c) do dessiltador.	76
Figura 4.8 - Tensão inicial <i>versus</i> tempo de repouso.....	77
Figura 4.9 - Distribuição granulométrica acumulativa: secador de cascalho sonda 1 (a), saída do poço e fluido recuperado no <i>Mud Cleaner</i> sonda 1 (b), secador de cascalho sonda 2 (c), dessiltador da sonda 2 (d) e dessiltador da sonda 5 (e).	78
Figura 4.10 - Gráficos dos modelos de distribuição granulométrica em comparação com os dados experimentais da alimentação do dessiltador das sondas 2 (a) e 5 (b).	80
Figura 4.11 - Distribuição granulométrica de frequência: secador de cascalho sonda 1 (a), saída do poço e fluido recuperado no <i>Mud Cleaner</i> sonda 1 (b), secador de cascalho sonda 2 (c), dessiltadores sonda 2 (d) e dessiltadores sonda 5 (e).....	84
Figura A.1 - Sonda 1/Entrada das peneiras.....	97

Figura A.2 - Sonda 1/Recuperado no <i>Mud Cleaner</i>	98
Figura A.3 - Sonda 2/Alimentação do dessiltador.....	99
Figura A.4 - Sonda 2/ <i>Overflow</i> do dessiltador	100
Figura A.5 - Sonda 2/ <i>Underflow</i> do dessiltador.....	101
Figura A.6 - Sonda 2/Fluido recuperado no secador	102
Figura A.7 - Sonda 3/Fluido reserva	103
Figura A.8 - Sonda 3/Fluido puro.....	104
Figura A.9 - Sonda 3/Fluido recuperado no secador.....	105
Figura A.10 - Sonda 3/Alimentação do dessiltador.....	106
Figura A.11 - Sonda 3/ <i>Underflow</i> dos dessiltador	107
Figura A.12 - Sonda 3/ <i>Overflow</i> dos dessiltador.....	108
Figura A.13 - Sonda 4/Fluido reserva	109
Figura A.14 - Sonda 4/Fluido puro.....	110
Figura A.15 - Sonda 4/Fluido recuperado no secador	111
Figura A.16 - Sonda 5/Alimentação dessiltador.....	112
Figura A.17 - Sonda 5/ <i>Overflow</i> dessiltador	113
Figura A.18 - Sonda 5/ <i>Underflow</i> dessiltador	114
Figura B.1 - Sonda 1/Alimentação das peneiras	117
Figura B.2 - Sonda 1/Fluido recuperado no Mud Cleaner	118
Figura B.3 - Sonda 1/Alimentação do secador.....	119
Figura B.4 - Sonda 1/ Cascalho na saída do secador.....	120
Figura B.5 - Sonda 2/Alimentação do dessiltador.....	121
Figura B.6 - Sonda 2/ <i>Overflow</i> do dessiltador	122
Figura B.7 - Sonda 2/ <i>Underflow</i> do dessiltador	123
Figura B.8 - Sonda 2/Alimentação do secador.....	124

Figura B.9 - Sonda 2/Fluido recuperado no secador.....	125
Figura B.10 - Sonda 2/Cascalho na saída do secador	126
Figura B.11 - Sonda 5/Alimentação do dessiltador	127
Figura B.12 - Sonda 5/ <i>Overflow</i> na saída do secador	128
Figura B.13 - Sonda 5/ <i>Underflow</i> na saída do secador.....	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Taxa de geração de cascalho e consumo de fluido de perfuração.....	13
Tabela 2.2 - Classificação de sólidos quanto ao tamanho.	17
Tabela 3.1 - Relação entre diâmetro do cilindro de um hidrociclone com sua capacidade em galões por minuto, pressão de alimentação e diâmetro de corte.	40
Tabela 3.2 - Condições de operação das sondas e características do fluido de perfuração.....	47
Tabela 4.1 - Concentrações de água, fase orgânica e sólidos na lama de perfuração	60
Tabela 4.2 - Massa específica dos sólidos nas sondas 1, 2, 3, 4 e 5.....	61
Tabela 4.3 - Parâmetros estimados para os modelos reológicos de Bingham, PL, HB e RS: sondas 1 e 2.	67
Tabela 4.4 - Parâmetros estimados para os modelos reológicos de Bingham, PL, HB e RS: sondas 3 e 4.	68
Tabela 4.5 - Parâmetros estimados para os modelos reológicos de Bingham, PL, HB e RS: sonda 5.....	69
Tabela 4.6 - Comparação dos parâmetros do modelo de Bingham medidos em campo e em laboratório..	70
Tabela 4.7 - Viscosidade aparente (em cP) do material amostrado à taxa de 2100 s^{-1}	72
Tabela 4.8 - Tixotropia (em Pa/s) do material amostrado nas sondas 3 e 4.....	77
Tabela 4.9 - Resultados do ajuste dos dados aos modelos de distribuição granulométrica acumulativa para os sólidos das correntes de lama de perfuração da sonda 1.	81
Tabela 4.10 - Resultados do ajuste dos dados aos modelos de distribuição granulométrica acumulativa para os sólidos das correntes de lama de perfuração da sonda 2.	82
Tabela 4.11 - Resultados do ajuste dos dados aos modelos de distribuição granulométrica acumulativa para os sólidos das correntes de lama de perfuração da sonda 5	82

LISTA DE SÍMBOLOS

d_p	Diâmetro característico de uma partícula.	[μm]
d_{50}	Diâmetro médio correspondente ao <i>undersize</i> de 50%.	[μm]
$d_{63,2}$	Diâmetro médio correspondente ao <i>undersize</i> de 63,2%.	[μm]
d_{100}	Diâmetro médio correspondente ao <i>undersize</i> de 100%.	[μm]
E	Magnitude do campo elétrico.	[V/m]
f	Frequência de microondas.	[Hz]
GI	Força gel inicial – 10 s de repouso, taxa de deformação de $5,11 \text{ s}^{-1}$.	[Pa]
GF	Força gel final – 10 min de repouso, taxa de deformação de $5,11 \text{ s}^{-1}$.	[Pa]
gpm	Gallon (US) per minute.	[gal/min]
K	Índice de consistência de modelos reológicos.	[Pa.s ⁿ]
L600	Tensão de cisalhamento à taxa de 1022 s^{-1} .	[Pa]
L300	Tensão de cisalhamento à taxa de 511 s^{-1} .	[Pa]
L200	Tensão de cisalhamento à taxa de $340,67 \text{ s}^{-1}$.	[Pa]
L100	Tensão de cisalhamento à taxa de $170,33 \text{ s}^{-1}$.	[Pa]
L6	Tensão de cisalhamento à taxa de $10,22 \text{ s}^{-1}$.	[Pa]
L3	Tensão de cisalhamento à taxa de $5,11 \text{ s}^{-1}$.	[Pa]
n	Índice de comportamento de modelos reológicos ou parâmetro de modelos de distribuição granulométrica acumulativa.	[-]
Pd	Densidade de potência.	[W/cm ²]
ppg	Pounds per gallon (US).	[lb _m /gal]
ϵ_0	Constante de permissividade do meio.	[F/m]
ϵ''	Fator de perda dielétrica.	[-]
τ	Tensão de cisalhamento.	[Pa]
τ_0	Tensão crítica ou limite de escoamento.	[Pa]
γ	Taxa de deformação.	[s ⁻¹]
γ_0	Correção da taxa de deformação.	[s ⁻¹]

TERMINOLOGIA

Cascalho	Sólidos gerados durante a perfuração de poços de petróleo e gás.
Cascalho seco	Cascalho na saída do secador de cascalhos.
Cascalho molhado	Cascalho à entrada do secador de cascalhos.
Cascalho de perfuração	Mesmo sentido de cascalho.
Controle de Sólidos	Processo de separação sólido-líquido (cascalho + fluido), em sondas de perfuração de petróleo e gás, composto por diversos tipos de equipamentos como peneiras e centrífugas.
Desareiaadores	Hidrociclones de 8 a 12 in.
Dessiltadores	Hidrociclones de 4 a 6 in.
Fluido puro	Fluido de perfuração recuperado e condicionado para ser novamente utilizado no processo de perfuração de poços.
Fluido reserva	Fluido de perfuração preparado e condicionado, mas que ainda não foi utilizado na perfuração de poços.
Lama de perfuração	Fluido de perfuração reutilizado contendo sólidos de perfuração e aditivos.
Sólidos de perfuração	Sólidos gerados durante a perfuração de poços de petróleo e gás, também chamados de cascalhos.
Secador de cascalho	Centrífuga filtrante vertical utilizada para reduzir o teor de fluido de perfuração no cascalho.

RESUMO

A perfuração, uma das etapas da exploração de petróleo e gás, hoje objetiva cenários geológicos de grande complexidade, com elevadas profundidades. Como efluente da atividade exploratória há a geração de cascalhos contaminados ou revestidos com fluido de perfuração. Uma legislação ambiental mais rigorosa e a necessidade de reduzir os custos de perfuração (prospecção e produção) apontam para a necessidade de otimização da separação e reciclagem do fluido de perfuração de poços de petróleo e gás. A atividade petrolífera é desenvolvida em condições cada vez mais restritivas do ponto de vista ambiental, sendo incessantes os estudos e investimentos em busca da sustentabilidade. Como exemplos de equipamentos para o processamento da lama de perfuração podem ser citados as peneiras vibratórias, os hidrociclones e as centrífugas. Neste contexto, o presente trabalho traz um estudo detalhado das características dos sólidos e da lama de perfuração – base n-parafina – em diferentes pontos do processo de controle de sólidos, com o objetivo de investigar o comportamento dos mesmos e sua alteração ao longo do processo. Foram realizadas análises de concentração de água, fase orgânica e sólidos na lama, densidade dos sólidos, reologia e tixotropia da lama e granulometria dos sólidos. Para isso, amostras de lama de perfuração foram coletadas ao longo do sistema de controle de sólidos em cinco sondas de perfuração terrestre da Petrobras no interior da Bahia (BA). As concentrações analisadas são de grande importância na investigação da eficiência de operação dos equipamentos do processo de controle de sólidos. A massa específica dos sólidos é bem próxima da massa específica de argilas. Os resultados de reologia mostram que a lama de perfuração em todo o processo de controle de sólidos se comporta como um fluido não-newtoniano, pseudoplástico, viscoplástico e tixotrópico. A granulometria dos sólidos varia com as condições de operação e apresenta, no geral, dois diâmetros médios em cada corrente amostrada. O secador de cascalho, um tipo de centrífuga vertical, desempenha papel fundamental na adequação dos resíduos às leis ambientais de descarte, principalmente em plataformas *offshore*. Assim, visando futuramente a otimização ou mesmo reestruturação desta etapa do processo de descarte de resíduos, foi realizado um estudo sobre esse equipamento e levantado os pontos principais de sua estrutura e operação.

Palavras-chaves: fluido de perfuração, controle de sólidos, caracterização, separação sólido-líquido, cascalho de perfuração, secador de cascalho.

ABSTRACT

Drilling, one of the stages of oil and gas exploration, now has as targets regions of great complexity, with high depths. Coated or contaminated cuttings with drilling fluid are a result of drilling. The drilling fluids are water-based or non-aqueous based liquids. A more restrictive environmental legislation and the need to reduce the costs of drilling (exploration and production) lead to optimization of solid-liquid separation and recycling drilling fluids. Because oil industry has to submit itself to ever more stringent environmental laws it has applied a great deal of investments on sustainability research. In this context, this work provides a study of the characteristics of drilling cuttings and synthetic drilling muds at different steps of the solids control system, in order to know their behavior and its change over the process. The concentration of water, organic phase and solids in the mud were measured. The density and particle size of the cuttings were analyzed. The rheology and thixotropy of the mud were investigated. For this, samples of drilling mud were collected throughout the solids control system of five PETROBRAS' *onshore* drilling rigs in Bahia (BA). The concentrations index are so important when investigating the efficiency of operation of the equipments in the solids control. The density of solids is very close to the density of clays. The results show that the rheology of drilling mud in the solids control process behaves as a non-Newtonian fluid, pseudoplastic, viscoplastic and thixotropic. The particle size of solids varies with operating conditions and always presents two average diameters by sample. The cutting dryer, a vertical centrifuge, plays a key role in the waste disposal due the stringent environmental laws, especially on *offshore* platforms. Thus, in order to research the optimization or restructuration of this step in the waste disposal, a study was carried on this equipment and the main points of its structure and operation were reported.

Key-words: drilling fluid, solids control, characterization, solid-liquid separation, drilled cuttings, cutting dryer.

CAPITULO I

INTRODUÇÃO

O crescimento global das indústrias petrolíferas tem por efeito uma busca constante por inovação e tecnologia objetivando aumentar não somente a lucratividade como também a competitividade. Essa busca tem levado as empresas petrolíferas à necessidade de soluções quanto ao controle de sólidos em sondas de perfuração de petróleo e gás. Fato que leva a separação sólido-líquido, necessária ao reaproveitamento do fluido de perfuração e adequação do cascalho às leis ambientais, a novos patamares.

Os fluidos de perfuração são cuidadosamente formulados com o intuito de se obter uma emulsão bastante estável com determinada viscosidade aparente, pois esse parâmetro é extremamente importante para que o fluido desempenhe de maneira eficiente e eficaz suas funções, principalmente a de carrear os cascalhos gerados no poço, durante a perfuração, mantendo uma concentração de cascalho no interior do poço não muito elevada (ASME, 2005). O monitoramento das características do fluido de perfuração que está entrando no poço é o único controle feito em uma sonda de perfuração de petróleo e gás. Atualmente, não existe em sondas nenhum sistema de controle *on-line* ou automação do processo de separação sólido-líquido necessário para o reaproveitamento do fluido de perfuração e limpeza do cascalho.

Na indústria de petróleo, os conhecimentos básicos de reologia irão auxiliar na análise do comportamento de diversos tipos de fluidos empregados nas etapas de perfuração e produção de poços, e transporte e refino do petróleo. Entre outras aplicações, a definição dos parâmetros reológicos do fluido de perfuração, por sua vez, permitirá que se estimem as perdas de pressão por fricção também denominada de perdas de carga e a capacidade de transporte e sustentação dos sólidos (MACHADO, 2002).

As informações de concentrações de água, fase orgânica e sólidos na lama, bem como, massa específica e granulometria dos sólidos são essenciais no estudo de cada equipamento que compõe o sistema de controle de sólidos. Essas características influenciam direta ou indiretamente na eficiência desses equipamentos.

O bom projeto de um sistema de controle de sólidos prevê a instalação de vários tipos de equipamentos em série e é de suma importância observar que cada estágio de processamento possui um alto grau de dependência com o seu predecessor, ou seja, para

que um dado equipamento tenha uma eficiência adequada, o equipamento em série imediatamente antes deve estar operando de acordo com a sua capacidade. Caso contrário, haverá uma sobrecarga no equipamento seguinte, ocasionando a redução da eficiência global do sistema (PETROBRAS, 2008).

Um equipamento de extrema importância no processo de reaproveitamento do fluido de perfuração é o secador de cascalho, que é na verdade uma centrífuga filtrante vertical utilizada para retirar grande quantidade de fluido de perfuração ainda presente nos sólidos gerados pela perfuração e que já passaram por diversos equipamentos de separação. Essa centrífuga não faz parte do sistema de controle de sólidos em termos de eficiência, uma vez que esse equipamento não opera continuamente como os outros que compõem o processo de controle de sólidos. Isso significa dizer que, quando a eficiência do processo é calculada, esse equipamento não é levado em conta. Porém, o secador de cascalho é peça fundamental na adequação dos resíduos aos padrões ambientais de descarte e na máxima recuperação de fluido de perfuração. Esse equipamento essencial na atualidade, devido as crescentes exigências ambientais, têm ganhado maior atenção por parte das indústrias petrolíferas e será descrito no presente trabalho.

O objetivo geral desta dissertação é investigar o processo de controle de sólidos em sondas de petróleo e gás. O foco principal do trabalho é a descrição do comportamento reológico da lama de perfuração e a caracterização física dos sólidos de perfuração ao longo do processo de controle de sólidos. A motivação é levantar dados e informações que sejam a base para trabalhos futuros que estudem cada equipamento do processo de controle de sólidos de maneira peculiar e também na busca pela automação e otimização deste processo. Os resultados obtidos podem também ser úteis no estudo de técnicas alternativas que adequem os cascalhos de perfuração às leis ambientais.

CAPITULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fluidos de perfuração

A perfuração, após a exploração, é a segunda etapa na busca por petróleo. Ela ocorre em locais previamente determinados pelas pesquisas geológicas e geofísicas e estabelecidos de forma a minimizar os danos ambientais e atender às condições técnicas de modo que seja possível atingir, a partir da superfície, a provável jazida (LIMA; SOUZA, 2002). Os fragmentos da rocha, gerados durante a perfuração, são comumente chamados de cascalho e são removidos continuamente através de um fluido ou lama de perfuração. Esse fluido é injetado por bombas para o interior da coluna de perfuração, através da cabeça de injeção e retorna à superfície pelo espaço anular, formado pelas paredes do poço e pela coluna (THOMAS, 2001). O fluido de perfuração é separado dos cascalhos através de um processo de separação sólido-líquido e, depois de devidamente tratado, retorna ao poço, operando assim em circuito fechado. A análise contínua dos cascalhos permite detectar os primeiros indícios de hidrocarbonetos nas formações rochosas (LIMA; SOUZA, 2002).

Os fluidos de perfuração são misturas complexas de sólidos, líquidos e, por vezes, até gases. Do ponto de vista químico, eles podem assumir aspectos de suspensão, dispersão coloidal ou emulsão, dependendo do estado físico de seus componentes. Quando da perfuração dos primeiros poços de petróleo utilizava-se a própria argila da formação misturada à água formando uma espécie de lama, motivo do fluido também ser denominado lama de perfuração. A utilização de fluidos de perfuração começou em 1901 no poço de *Spindletop* no Texas e seu desenvolvimento permanece até hoje como um grande desafio para a indústria do petróleo, na busca pelo ponto ótimo entre custo, performance técnica, e a partir da década de 80, o atendimento às exigências ambientais (SCHAFFEL, 2002). A eficiência da perfuração de um poço depende das características das rochas perfuradas, das características do fluido de perfuração, tais como viscosidade, densidade e vazão, e dos parâmetros operacionais, tais como rotação, tipo de broca, peso aplicado sobre a broca e jatos utilizados.

A Figura 2.1 a seguir ilustra um fluido de perfuração do tipo sintético que retorna do poço, neste ponto a lama encontra-se a aproximadamente 45 °C.



Figura 2.1 - Fluido de perfuração sintético que retorna do poço sendo perfurado.

2.1.1 Tipos de fluido de perfuração

A classificação de um fluido de perfuração é feita em função de sua composição. Embora ocorram divergências, o principal critério se baseia no constituinte principal da fase continua ou dispersante. Neste critério, os fluidos são classificados em fluidos de base aquosa e fluidos de base não aquosa. Há ainda a utilização de gás, que pode ser ar ou gás natural, e lamas aeradas (normalmente com nitrogênio), no entanto, essa prática é pouco utilizada. A partir do final da década de 80 a pesquisa e desenvolvimento de fluidos de base não aquosa, passaram a adquirir importância crescente e estratégica, em função do rigor crescente da legislação ambiental internacional. Esses fluidos são classificados de acordo com o fluido base utilizado em sua formulação e estes em função de sua origem e conteúdo de hidrocarbonetos poliaromáticos (THOMAS, 2001; ASME, 2005; AMOCO, 1994).

2.1.1.1 Base aquosa

A definição de um fluido a base de água considera principalmente a natureza da água e os aditivos químicos empregados no preparo do fluido. A proporção entre os componentes básicos e as interações entre eles provoca sensíveis modificações nas propriedades físicas e químicas do fluido. Consequentemente, a composição é o principal fator a considerar no controle das suas propriedades. A água é a fase continua e o principal componente de qualquer fluido à base água (THOMAS, 2001). Os fluidos de base aquosa são, geralmente, de fácil manipulação, de baixo custo de manutenção, podem ser formulados para superar diversos problemas de perfuração e causam um menor impacto ambiental em relação aos fluidos não aquosos. A fim de melhor compreender o amplo espectro de fluidos à base de água, eles são divididos em três subclassificações principais (AMOCO, 1994):

- Não-inibidores
- Inibidores

- Polímeros

Os fluidos não-inibidores são aqueles que não suprimem significativamente o inchaço da argila, são geralmente compostos por argilas nativas ou bentonitas comerciais com pequena quantidade de soda cáustica ou cal. Eles também podem conter defloculantes e/ou dispersantes, tais como: lignitos, lignosulfonatos ou fosfatos. Sólidos nativos são dispersos no sistema quando as propriedades reológicas do fluido não puderem mais ser controladas pela diluição da água. Já os fluidos inibidores retardam sensivelmente a expansão da argila e alcançam essa inibição pela presença de cátions; tipicamente, sódio (Na^+), cálcio (Ca^{++}) e potássio (K^+). Geralmente o potássio e o cálcio, ou uma combinação dos dois, fornecem a maior inibição de dispersão de argila. Estes sistemas são geralmente utilizados para a perfuração de argilas hidratáveis ou areias contendo argilas hidratáveis. Como a fonte do cátion é geralmente um sal, o descarte de resíduos pode tornar-se uma parcela importante do custo do uso de um fluido inibidor. Os fluidos poliméricos dependem de macromoléculas, com ou sem interação com a rocha perfurada, para conferir propriedades à lama e são muito diversificados na sua aplicação. Estes fluidos podem ser inibidores ou não dependendo, sobretudo, da utilização ou não de um cátion inibidor. Os polímeros podem ser utilizados para aumentar a viscosidade dos fluidos, controlar as propriedades de filtração, promover a defloculação ou encapsulamento dos sólidos. A estabilidade térmica de sistemas poliméricos pode ultrapassar 200 °C. Apesar da sua diversidade, fluidos poliméricos têm limitações. Os sólidos são uma grande ameaça para a relação custo-benefício de um sistema de fluido polimérico (AMOCO, 1994).

Segundo SCHAFFEL (2002), a grande desvantagem dos fluidos aquosos é o “inchamento” das argilas hidrofílicas presente neste tipo de fluido ou mesmo da formação. Este fenômeno pode provocar a instabilidade do poço e a perda de fluido para as formações rochosas, além da geração extra de material. Alguns problemas operacionais tais como encerramento, aumento do torque, *drag* e até prisão da coluna, também podem decorrer do “inchamento” das argilas. A hidratação das argilas é minimizada pela adição dos aditivos mencionados, porém, ainda assim, o problema em questão não é completamente sanado. Além disso, quando um fluido de base aquosa possui alta atividade de água, este pode vir a promover a dissolução de formações salinas. Devido a tais dificuldades, os fluidos de perfuração à base de água, mesmo sendo constantemente aprimorados, não conseguiram acompanhar alguns dos desafios que foram surgindo com a mudança do contexto exploratório, como a perfuração direcional, em águas profundas ou em formações salinas. A

utilização dos fluidos à base de água nestes empreendimentos pode tornar a perfuração lenta, custosa ou até mesmo impossível.

2.1.1.2 Base não aquosa

Os fluidos de perfuração base não aquosa são freqüentemente divididos em fluidos base óleo e fluidos base sintética. Os fluidos a base de óleo são derivados do petróleo e incluem óleo diesel, óleo mineral e parafinas lineares. Os fluidos sintéticos são derivados de reações química, nas quais o etileno é um exemplo de matéria prima, nessa classe de fluidos têm-se as olefinas, ésteres e parafinas lineares sintéticas (ASME, 2005). Os fluidos de perfuração são de base não aquosa quando a fase continua ou dispersante é constituída por uma fase não aquosa, geralmente composta de hidrocarboneto líquido. Alguns sólidos coloidais, de natureza inorgânica e/ou orgânica, podem compor a fase dispersa. Segundo THOMAS (2001), os fluidos de perfuração podem ser emulsões de água em óleo propriamente dita ou inversa, em ambos os casos a fase contínua é a fase orgânica, no entanto, na emulsão convencional o teor de água emulsionada é inferior a 10% enquanto que na emulsão inversa esse teor vai de 10 a 45%.

O principal uso de fluidos base não aquosa é em perfurações de folhelhos altamente reativos, a fim de garantir a estabilidade do poço. Eles são aplicáveis também na perfuração de poços com grande inclinação por causa de seu alto grau de lubricidade e capacidade de impedir a hidratação de argilas. Eles também podem ser selecionados para aplicações especiais, como poços de alta temperatura e alta pressão, minimizando o dano à formação. Outra razão para escolha de fluidos não aquosos é que eles são resistentes a contaminantes, como anidrita, sal e gases ácidos de CO_2 e H_2S . O custo é uma grande preocupação ao se optar por fluidos de base não aquosa. O custo de se utilizar a lama base óleo ou sintética é muito alto quando comparado a um sistema convencional de lama à base de água. No entanto, como fluidos de base não aquosa podem ser recuperados e reutilizados, o custo da utilização desse tipo de fluido pode chegar a ser comparável ao custo do uso de fluidos à base de água. Além disso, essas lamas podem tornar-se uma alternativa atraente em situações onde a utilização de lamas à base de água é totalmente inviável para garantir o sucesso da perfuração e/ou conclusão de um poço (AMOCO, 1994).

A grande desvantagem dos fluidos não aquosos é sua alta toxicidade. Hoje, com as crescentes preocupações ambientais, a utilização dessas lamas é proibida ou severamente restringida em muitos países. Em algumas regiões, as leis para disposição de cascalhos contendo certo teor de óleo são tão severas que os custos de contenção, transporte e

eliminação pode inviabilizar a utilização deste tipo de fluido. Além disso, o cascalho descartado ao mar proveniente de um poço onde foi utilizada lama de base não aquosa tende a se aglomerar em “placas”, que passam rapidamente pela coluna d’água acumulando-se no fundo do mar sob a forma de pilhas submarinas. O mesmo não ocorre quando se usa fluido de base aquosa. Neste caso o cascalho não tende a se acumular, dispersando-se pelo assoalho marinho (SCHAFFEL, 2002). Esse efeito de dispersão de cascalho quando se utiliza lama de perfuração base aquosa e base não aquosa é mostrado na Figura 2.2:

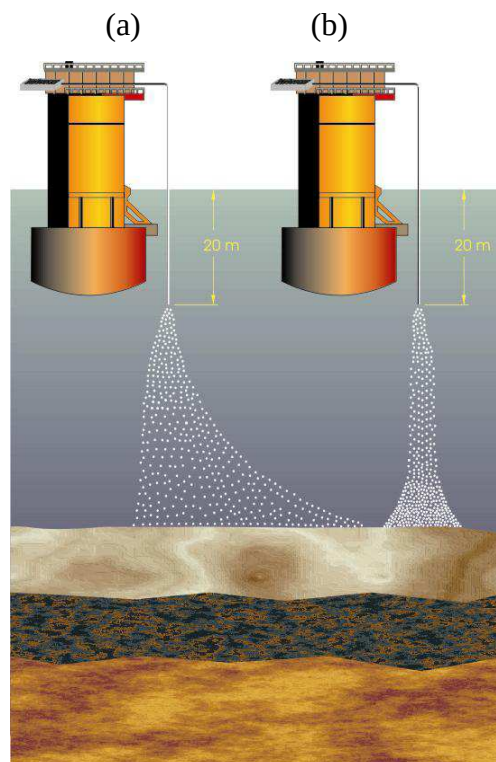


Figura 2.2 - Efeito de dispersão de cascalho com fluido base aquosa (a) e não aquosa (b).

A formação de pilhas de cascalho no fundo do mar pode ser amenizada ou mesmo extinguida quando a concentração de fluido sintético nos cascalhos é inferior a 5%. Neste caso, os sólidos descartados são rapidamente hidratados pela água do mar comportando-se então como cascalhos revestidos de fluido base aquosa (US EPA, 2000).

Os fluidos de perfuração sintéticos foram desenvolvidos como uma alternativa às limitações de desempenho dos de base aquosa e em resposta às restrições ambientais impostas aos fluidos à base de óleo. Utilizando como fluido base substâncias químicas sintéticas, os fluidos sintéticos são também chamados “pseudo-lamas à base de óleo”, pois na prática as substituem, oferecendo menor toxicidade e produção de menor volume de resíduos de perfuração. Os sintéticos são muito utilizados em áreas marítimas onde é proibido o descarte

de cascalho quando se perfura com lamas à base de óleo. Os fluidos sintéticos são mais caros do que os oleosos, não deixando de serem economicamente compensadores, pois o descarte marítimo do fluido de perfuração à base de óleo está proibido em diversas partes do mundo implicando em custos e riscos a serem assumidos com o transporte dos resíduos para descarte em terra (SCHAFFEL, 2002).

2.1.1.3 Pneumático

Os fluidos pneumáticos (a base de ar/gás) são utilizados para perfurações em zonas esgotadas ou em áreas onde formações de baixíssima pressão podem ser encontradas. Uma vantagem de fluidos pneumáticos é o fato de alcançarem elevadas taxas de penetração. Com o uso deste tipo de fluido, os cascalhos são literalmente arrancados da formação rochosa à frente da broca, como resultado do considerável diferencial de pressão. O alto diferencial de pressão também permite que os fluidos presentes nas formações de zonas permeáveis escoem na direção do poço. Fluidos a base de ar/gás são ineficazes em áreas onde ocorrem grandes volumes de fluidos na formação. Um grande afluxo de fluidos na formação exige a conversão do fluido pneumático para um sistema de base líquida. Outra consideração que deve ser feita quando um fluido pneumático for selecionado é a profundidade do poço. Esse tipo de fluido não é recomendado para profundidades superiores a 3000 m, pois o volume de ar requerido neste caso para carrear o cascalho até o topo do poço é maior do que a capacidade do equipamento que faz a injeção de ar (AMOCO, 1994).

Os fluidos de perfuração aerados executam satisfatoriamente suas funções nas operações de perfuração, exceto em relação ao transporte de cascalho (ainda que apresentem a grande vantagem de não contaminar o cascalho) e ao controle de pressões subterrâneas. Por este motivo, sua aplicação fica limitada a regiões que possuam autorização legal e existência de formações de baixa permeabilidade, como calcários ou formações com rochas muito duras (SCHAFFEL, 2002).

2.1.2 Funções dos fluidos de perfuração

As lamas de perfuração devem ser especificadas de forma a garantir uma perfuração rápida e segura. Assim, é desejável que o fluido apresente as seguintes características (THOMAS, 2001):

- Ser estável quimicamente.
- Estabilizar as paredes do poço, mecânica e quimicamente.
- Facilitar a separação de cascalho na superfície.

- Manter os sólidos em suspensão quando estiver em repouso.
- Ser inerte em relação às rochas produtoras.
- Aceitar qualquer tratamento físico e químico.
- Ser bombeável.
- Apresentar baixo grau de corrosão e de abrasão em relação à coluna de perfuração e demais equipamentos do sistema de circulação.
- Facilitar as interpretações geológicas do material retirado do poço.
- Apresentar custo compatível com a operação.

As lamas têm papel fundamental e desempenham uma série de funções essenciais para uma operação eficiente de perfuração. Algumas delas estão descritas a seguir, segundo ASME (2005):

Controle da pressão e estabilidade do poço. Exercer pressão hidrostática sobre as formações, de modo a evitar o influxo de fluidos indesejáveis e estabilizar as paredes do poço é outra importante função da lama de perfuração. O fluido é projetado para evitar acidentes, visando contrabalancear a pressão natural das formações rochosas. Um equilíbrio apropriado deve ser obtido, no qual a pressão do fluido de perfuração contra as paredes do poço é suficiente para contrabalancear a pressão exercida pelas formações rochosas, porém esta não pode ser muito alta, para não danificar o poço. A pressão das lamas depende basicamente de sua densidade. Diversos aditivos como a baritina são acrescentados às lamas para aumentar a sua densidade e, dessa forma aumentar a pressão exercida sobre as paredes do poço. Esta densidade deve ser ajustada para atender as condições específicas de cada poço.

Remover os sólidos de perfuração. Limpar o fundo do poço dos cascalhos gerados pela broca e transportá-los até a superfície é uma das funções dos fluidos de perfuração. Este papel é extremamente importante para diminuir os esforços da broca, que é um dos equipamentos mais exigidos na perfuração. O fluido de perfuração é bombeado pelo interior da tubulação de perfuração, remove os cascalhos e os carrega até a superfície. O fluido deve ter a capacidade de fazer com que as rochas “flutuem” juntamente com a lama, limpando a área de trabalho das brocas. Na Figura 2.3 tem-se um exemplo da importância da atuação do fluido na limpeza dos sólidos na zona de perfuração e no contato entre broca e formação rochosa.

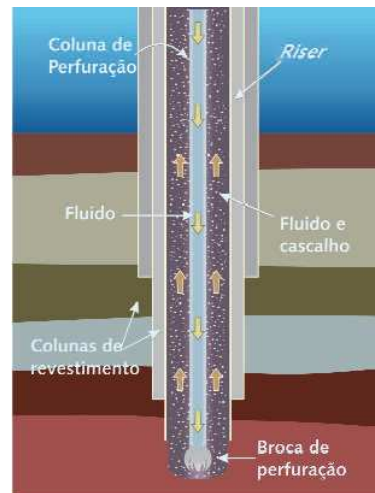


Figura 2.3 - Fluido de perfuração sendo injetado dentro da coluna.

Resfriar a broca e lubrificar a coluna de perfuração. Quando a broca gira em contato com a rocha, ocorrem diversos problemas ligados ao atrito e ao aquecimento. Do mesmo modo, o canal de perfuração também sofre com o atrito das formações rochosas e, também pelos esforços na tubulação, sobretudo de torção. As lamas têm a função de lubrificar e de resfriar estes equipamentos para estender a vida útil da broca e diminuir os esforços das tubulações.

Estabilizar as formações rochosas. A prioridade é manter o mais estável possível as formações expostas ao trabalho da broca giratória. Isto é feito por meio da manutenção da pressão do fluido de perfuração acima da pressão do fluido contido nos poros das rochas. Existe uma tendência natural de que o fluido de perfuração penetre na rocha permeável da formação, com a utilização de aditivos nas lamas, isso pode ser minimizado. As formações rochosas com alto conteúdo de argila também tendem a serem lavadas e removidas pela água. Essas formações exigem um fluido inibidor para manter um poço estável e evitar o alargamento ou remoção pela ação da água ou ainda a utilização de um fluido base não aquosa. Após chegar até a rocha-reservatório, a composição do fluido de perfuração pode exigir uma mudança, a fim de evitar a obstrução dos poros da rocha.

Aquisição de dados no fundo do poço. Estes dados são extremamente importantes para que a perfuração transcorra da melhor maneira possível. Os principais dados são: análise do cascalho e pressão no interior do poço. Estes testes são primordiais para se realizar algumas correções na lama, tais como a adição de elementos e aditivos e, também, substituição do tipo de lama utilizado.

Outras funções das lamas de perfuração são: controle de corrosão, facilitar a completação do poço, minimizar o impacto ambiental e auxiliar na sustentação da coluna de

perfuração. A função mais crítica de um fluido de perfuração é limpar o poço removendo os cascalhos gerados no processo e presentes em torno da broca e no espaço anular. A quantidade de cascalho no fluido aumenta continuamente e se estes sólidos não forem removidos o fluido rapidamente perde a sua capacidade de limpar o poço e cria uma espessa camada de sólidos. Para permitir a reutilização e reciclagem do fluido os cascalhos devem ser continuamente e eficientemente removidos da lama de perfuração.

2.1.3 Propriedades importantes dos fluidos de perfuração

Alguns testes são feitos em campo a fim de avaliar a qualidade do fluido de perfuração, isto é, algumas de suas propriedades físicas e químicas, bem como, o desenvolvimento da perfuração em si mesma. Para a realização destes testes são utilizados equipamentos bastante compactos e de simples manipulação, com intuito de facilitar o trabalho do operador da sonda e também devido às restrições de infraestrutura observadas em uma sonda de perfuração (normalmente localizada em pequenas áreas isoladas ou ainda em alto mar). As propriedades de controle dos fluidos podem ser físicas ou químicas. As propriedades físicas mais importantes e freqüentemente medidas nas sondas são a densidade, os parâmetros reológicos, as forças géis, os parâmetros de filtração e o teor de sólidos. As propriedades químicas determinadas com maior freqüência nos laboratórios das sondas são o pH, os teores de cloreto e de bentonita e a alcalinidade. Algumas propriedades estão descritas a seguir segundo THOMAS (2001):

Densidade. Os limites de variação da densidade dos fluidos para perfurar uma determinada fase são definidos pela pressão de poros (limite mínimo) e pela pressão de fratura (limite máximo) das formações expostas. Quando se deseja aumentar a densidade do fluido adiciona-se geralmente a baritina, BaSO_4 , que tem densidade 4,25, enquanto a densidade dos sólidos de perfuração é em torno de 2,60. Para se reduzir a densidade dos fluidos à base de água, dilui-se com água (densidade 1,00) ou óleo diesel (densidade 0,82).

Parâmetros reológicos. O comportamento do fluxo de um fluido é definido pelos parâmetros reológicos. Para isto considera-se que o fluido segue um modelo reológico, cujos parâmetros vão influir diretamente no cálculo de perdas de carga na tubulação e velocidade de transporte dos cascalhos.

Forças géis. Alguns fluidos de perfuração são tixotrópicos, isto é, adquirem um estado semi-rígido quando estão em repouso e voltam a adquirir um estado de fluidez quando estão novamente em movimento. A força gel é um parâmetro também de natureza reológica que indica o grau de gelificação devido à distribuição de cargas na superfície das partículas

dispersas. A força gel inicial mede a resistência inicial para colocar o fluido em fluxo. A força gel final mede a resistência do fluido para reiniciar o fluxo quando este fica certo tempo em repouso. A diferença entre elas indica o grau de tixotropia do fluido.

Parâmetros de filtração. A capacidade do fluido de perfuração de formar uma camada de partículas úmidas, denominada de reboco, sobre as rochas permeáveis expostas pelas brocas é de fundamental importância para o sucesso da perfuração e da completação do poço. Para formar o reboco deve haver o influxo da fase líquida do fluido do poço para a formação. Esse processo é conhecido por "filtração", é essencial que o fluido tenha uma fração razoável de partículas com dimensões ligeiramente menores que as dimensões dos poros das rochas expostas. Quando existem partículas sólidas com dimensões adequadas, a obstrução dos poros é rápida e somente a fase líquida do fluido (filtrado) invade a rocha. A qualidade do filtrado e a espessura do reboco são dois parâmetros medidos rotineiramente para definir o comportamento do fluido quanto à "filtração".

Teor de sólidos. O teor de sólidos, cujo valor deve ser mantido no mínimo possível, é uma propriedade que deve ser controlada com rigor porque o seu aumento implica aumento de várias outras propriedades importantes, além de aumentar a probabilidade de ocorrência de problemas como desgaste dos equipamentos de circulação, fratura das formações devido à elevação das pressões de bombeio ou hidrostática, prisão da coluna e redução da taxa de penetração. O tratamento do fluido para reduzir o teor de sólidos pode ser preventivo ou corretivo. O tratamento preventivo consiste em inibir o fluido, física ou quimicamente, evitando-se a dispersão das partículas. No método corretivo pode-se fazer uso de equipamentos extratores de sólidos, tais como tanques de decantação, peneiras, hidrociclones e centrífugas, ou diluir o fluido.

2.1.4 Alguns dados a respeito da geração de cascalho e consumo de fluido

Poucos dados são conhecidos sobre o consumo de fluido ou geração de cascalho. Porém, NICOLLI; SOARES (2010) consideram que em média um poço gera entre 500 e 800 m³ de material resultante da trituração das rochas pela broca. Também é possível estimar a “produção” de cascalho através da taxa de penetração e diâmetro do poço: o volume de cascalho produzido por hora é igual ao volume de poço perfurado por hora. O volume de fluido consumido por tonelada de cascalho pode ser estimado pela vazão de fluido dividida pela taxa de “produção” de cascalho. A Tabela 2.1 a seguir ilustra um exemplo destes cálculos para quatro sondas terrestres da Petrobras.

Tabela 2.1 - Taxa de geração de cascalho e consumo de fluido de perfuração.

Sonda	Fase	Profundidade do poço m	Vazão de fluido m ³ /h	Cascalho produzido m ³ /h	Fluido consumido m ³ /t de cascalho
1	2	2272	91	0,3	100,6
2	3	1619	98	0,3	143,1
3	2	610	82	0,4	82,7
4	2	1282	91	0,3	105,8

2.2 A questão ambiental quanto ao descarte de sólidos de perfuração

No Brasil, quanto à competência legal para aprovação e verificação das atividades *offshore*, cabe à Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) a aprovação e supervisão das atividades de perfuração, produção e processamento dos hidrocarbonetos produzidos; cabe à Marinha a aprovação e supervisão das embarcações (navios de apoio e plataformas, tanto de perfuração como de produção); e cabe ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis (IBAMA) a aprovação da área em que a atividade será desenvolvida, sob o ponto de vista de impacto no meio ambiente, e a aprovação do Plano de Emergência Individual, requisito para o licenciamento ambiental (ANP, 2010).

Assim, a elaboração de diretrizes ambientais é resultado do trabalho conjunto entre a ANP, os órgãos ambientais estaduais e o IBAMA com o objetivo de fornecer subsídios para o processo de licenciamento ambiental (IBAMA, 2010). Os Guias de Licenciamento ambiental indicam os níveis de exigência para a liberação das atividades de pesquisa sísmica, de perfuração de poços e produção de petróleo e gás natural, além de orientar a elaboração de estudos ambientais e programas de monitoramento decorrentes das exigências do processo de licenciamento ambiental.

A Coordenação Geral de Licenciamento de Petróleo e Gás (CGPEG) é o órgão executor do licenciamento ambiental das atividades marítimas de petróleo cedido pelo IBAMA. Os procedimentos para o licenciamento ambiental de atividades de Exploração e Produção Marítima de Petróleo estão regulamentados pelas Resoluções CONAMA nº 237/97, nº 23/94 e nº 350/04. As licenças referentes a essa tipologia de licenciamento são (IBAMA, 2010):

- *Licença de Pesquisa Sísmica (LPS)* - Deve ser solicitada ao IBAMA para a realização de atividades de aquisição de dados sísmicos marítimos e em zona de transição. A atividade pode ser classificada em três tipos distintos, conforme a sensibilidade ambiental da área. O procedimento para Classe 1 estabelece a elaboração de Estudo de Impacto Ambiental/Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) e realização de Audiência Pública; a

Classe 2 estabelece a elaboração de Estudo Ambiental de Sísmica/Relatório de Impacto Ambiental de Sísmica (EAS/RIAS) e, caso necessário, a realização de Reunião Técnica Informativa; a Classe 3 estabelece a elaboração de Informações Complementares e pressupõe a existência de um Plano de Controle Ambiental de Sísmica (PCAS) aprovado.

- *Licença Prévia para Perfuração (LPper)* - Autoriza a perfuração de poços para identificação de jazidas e suas extensões, mediante apresentação e aprovação de Relatório de Controle Ambiental (RCA).

- *Licença Prévia de Produção para Pesquisa (LPpro)* - Autoriza a produção para pesquisa da viabilidade econômica da jazida, mediante apresentação e aprovação de Estudo de Viabilidade Ambiental (EVA).

- *Licença de Instalação (LI)* - Autoriza a instalação das unidades e sistemas necessários à produção e ao escoamento, mediante apresentação e aprovação de Estudo de Impacto Ambiental (EIA) ou Relatório de Avaliação Ambiental (RAA).

- *Licença de Operação (LO)* - Autoriza o início da operação do empreendimento ou das suas unidades, instalações e sistemas integrantes, mediante apresentação e aprovação de Projeto de Controle Ambiental (PCA).

O processo de licenciamento ambiental de empreendimentos petrolíferos *offshore* tem representado, recentemente, tema efervescente no contexto brasileiro. As exigências impostas pelo órgão responsável pela liberação das licenças ambientais (IBAMA) têm levantado calorosas discussões, ao mesmo tempo em que trazem à tona a necessidade de levar em consideração, de forma séria e efetiva, a conservação do ambiente marinho, especialmente o de águas profundas, cujas informações, atualmente, são escassas. Um dos aspectos que deve ser avaliado é a quantidade de material contaminante aderido ao cascalho que é extraído do poço e lançado ao fundo do mar. O cascalho pode causar desequilíbrios no meio ambiente e as avaliações ambientais devem dar atenção aos possíveis impactos dessa ação (NICOLLI; SOARES, 2010)

Segundo o RIMA (2009), os impactos ambientais que podem advir da atividade de perfuração de um poço de petróleo *offshore* são classificados em: impactos operacionais e impactos acidentais. Os primeiros são próprios da atividade realizada e os que pertencem ao segundo grupo são aqueles que poderão ocorrer na eventualidade de um acidente. Os principais impactos operacionais estão relacionados à qualidade dos sedimentos, à qualidade da água e do ar, aos microorganismos marinhos, à fauna e flora do fundo do mar, aos peixes, tartarugas e mamíferos marinhos, à pesca, mão-de-obra e setor de serviços. Os impactos acidentais estão relacionados ao vazamento de óleo diesel, produtos químicos e petróleo.

O cascalho e o fluido de perfuração são os resíduos que caracterizam a perfuração dos poços de petróleo e gás. A polêmica em torno da utilização e descarte destes rejeitos tem os colocado em posição de destaque no debate internacional sobre a preservação do ecossistema na etapa de exploração marítima de petróleo e gás, o que vem exigindo uma legislação própria que regule a matéria no Brasil, principalmente após a abertura do setor de petróleo no país em 1997. Nos Estados Unidos e na Europa essa legislação já existe há alguns anos e é bastante exigente. A Agência de Proteção Ambiental Americana (US EPA) estipulou que o teor de fluido sintético aderido aos cascalhos descartados em plataformas *offshore* não pode ultrapassar 6,9% em massa e o descarte de cascalhos contaminados com fluido base óleo estão proibidos (US EPA, 2000). A Comissão Oslo/Paris (OSPAR) na Convenção para Proteção do Ambiente Marinho do Nordeste do Atlântico (2000) estabeleceu que o teor de fluido a base de óleo nos cascalho descartados em alto mar em território Europeu deve ser inferior a 1% em massa.

Em plataformas *onshore* o descarte de cascalho é proibido, para sanar esta dificuldade, esses resíduos de perfuração são depositados em aterros industriais e a empresa petrolífera é responsável por garantir a não interferência nos lençóis freáticos dessas regiões. Segundo PIRES (2009), algumas alternativas de reciclagem, como a fabricação de material asfáltico ou de construção civil a partir do cascalho de perfuração, têm sido implantadas.

2.3 Perspectivas quanto ao sistema de limpeza do cascalho

Os custos de manutenção de fluidos e de tratamento e descarte de resíduos, bem como todo o custo de perfuração, podem ser reduzidos drasticamente quando técnicas adequadas de controle de sólidos são utilizadas. Este fato foi constatado na indústria de petróleo no final do século XI quando ao abrir poços de petróleo em terra costumava-se separar os cascalhos provenientes da perfuração. Isto foi conseguido por uma série de açudes e poços que permitiram separar os sólidos naturalmente com o uso da gravidade e assim reutilizar o fluido de perfuração. Esta foi a primeira técnica de controle de sólidos já utilizada. A próxima inovação no controle de sólidos veio quando um sistema de peneiras vibratórias foi introduzido no início dos anos 1930 na indústria de petróleo. As peneiras foram projetadas a partir da tecnologia utilizada na indústria de mineração e permanecem até hoje a peça principal do sistema de controle de sólidos (BRICE, 2006).

Outro equipamento proveniente da indústria de mineração na década de 1930 foi o classificador de cone ou hidrociclone. O princípio básico deste dispositivo envolve a força centrífuga provocada pela alta velocidade do fluido de perfuração girando no interior do cone

e forçando os sólidos maiores e mais pesados a seguirem em direção à parede descendendo para a parte inferior do equipamento. Assim, as peneiras vibratórias juntamente com os hidrociclones tornaram-se parte integrante do sistema de controle de sólidos.

Atualmente, o que de mais avançado há no sistema de controle de sólidos é nada menos do que versões melhoradas dos equipamentos originais, introduzidos na indústria de petróleo há muitos anos. Embora muito mais eficiente e robusta a tecnologia base no controle de sólidos teve poucas mudanças ao longo das últimas décadas. O futuro dos sistemas de controle de sólidos será fundamentado nas diversas tentativas de aumentar a eficiência global de remoção de sólidos indesejáveis da lama de perfuração. Isso incluirá a melhoria contínua do conjunto de peneiras, incluindo a vida útil da tela, dos hidrociclones e centrífugas, além de um investimento considerável em pesquisa de tecnologias alternativas. A tendência contínua de regulamentos ambientais mais severos em todo o mundo tem exigido cada vez mais dos sistemas de controle de sólidos implementados também para minimizar o descarte de resíduos de perfuração (BRICE, 2006).

Os custos com fluido de perfuração e manutenção de equipamentos podem diminuir muito quando práticas corretas de controle de sólidos são utilizadas. Do ponto de vista do controle de fluido, seria desejável remover todos os sólidos de perfuração, porém, embora isso seja possível, seria economicamente inviável. O objetivo de um sistema de controle de sólidos é conseguir o equilíbrio entre a separação de sólidos e diluição do fluido que resultará em um nível aceitável de sólidos no fluido, com um custo mínimo, e ao mesmo tempo um teor de fluido nos resíduos que atenda às legislações ambientais.

A fase sólida de um fluido de perfuração é composta por sólidos comerciais ou de perfuração. A maioria dos sólidos comerciais, tais como bentonita, têm um tamanho de partícula inferior a um micron. Os sólidos de perfuração são aquelas partículas que entram no sistema de circulação na forma de detritos de perfuração. O diâmetro dos sólidos de perfuração depende das propriedades da rocha perfurada, do tamanho dos dentes ou insertos da broca e do tipo ou formato de broca adota (tricônica ou PDC).

Um dos objetivos mais importantes no controle de sólidos é remover o maior número de partículas grandes na primeira vez que estes sólidos são bombeados para fora do poço. Isso requer equipamentos devidamente projetados e instalados para processar no mínimo 100 a 125% da taxa de circulação de lama. Sólidos que não são removidos durante a primeira circulação da lama estão sujeitos à degradação mecânica pela broca, fresas e bombas de lama durante cada ciclo até que eles se tornam finos o suficiente para impedir sua remoção por meios mecânicos. Segundo ASME (2005), para avaliar a capacidade de remoção dos

equipamentos é necessário considerar a origem dos sólidos e classificá-los de acordo com os seguintes tamanhos (Tabela 2.2):

Tabela 2.2 - Classificação de sólidos quanto ao tamanho.

Denominação	Faixa de Tamanho (μm)	Tipos de Partículas
Cascalho	Maior que 2000	Sólidos de perfuração, cascalhos, pedras
Areia	74 a 2000	Areia, sólidos de perfuração
Lama	2 a 74	Barita, silte, sólidos de perfuração finos
Colóides	Menor que 2	Bentonita, argila, sólidos de perfuração ultrafinos

Existem diversos processos alternativos de tratamento de resíduos de perfuração, porém muitos deles, embora altamente eficientes, são ainda economicamente inviáveis. Alguns deles estão brevemente descritos (AIRD, 2006):

- Extração com solvente líquido e centrífugas com posterior separação de óleo, água e solvente por destilação.
- Solidificação / estabilização tem sido usado, mas exclui a reutilização do fluido.
- Bioremediação também está em uso, mas não ganhou importância significativa para os resíduos de perfuração, pois nesse processo o fluido é biodegradado e não pode ser reutilizado.
- O processo de incineração produz sólidos com baixíssimo teor de fluido, porém este método também exclui a reutilização do fluido e gera grandes emissões de gases poluentes.
- A dessorção térmica também é utilizada, porém em alguns casos ainda provoca a degradação química do fluido tornando-o não reutilizável.
- A secagem a vácuo é outra opção, porém não alcança baixos teores de fluido no cascalho, como exigem as legislações ambientais atuais.
- Outras técnicas mais recentes que vêm sendo estudadas e desenvolvidas são a dessorção termomecânica e a utilização de microondas.

2.3.1 Dessorção térmica

A tecnologia de dessorção térmica tem sido utilizada no processamento de sólidos de perfuração, no entanto, tem havido certa preocupação sobre a qualidade do fluido recuperado e sua reutilização. Esta tem sido uma preocupação especial quando se utiliza fluidos altamente refinados, pouco aromáticos, altamente saturados e óleos minerais ou de base sintética. A questão é que a energia térmica necessária para retirar uma quantidade suficiente de hidrocarbonetos aderidos ao cascalho para torná-lo apropriado para descarte pode resultar na

degradação térmica do fluido. A energia térmica também pode criar hidrocarbonetos aromáticos e insaturados indesejáveis que irão afetar a toxicidade e possivelmente até mesmo o desempenho do fluido de perfuração (SEATON et al., 2006).

Todo processo de dessorção térmica evapora a água e o óleo aderidos aos sólidos de perfuração. O calor necessário para evaporar a água e o óleo fornece energia suficiente para remover e separar também a emulsão óleo-água. O óleo puro e emulsificado e a água são removidos por destilação, no processo a água evapora primeiro produzindo vapor e a fase orgânica, que tem maior ponto de ebulição, evapora depois da água. A produção de vapor também pode ajudar no abaixamento do ponto de ebulição da fase orgânica. O objetivo da dessorção térmica é produzir sólidos livres ou com baixíssimo teor de fluido através de um processo de evaporação do fluido aderido ao cascalho e posterior recuperação do mesmo para reutilização na perfuração de poços. A Figura 2.4 ilustra o processo de dessorção térmica convencional.

A temperatura de craqueamento térmico é uma função do tamanho da molécula. Moléculas maiores sofrem craqueamento a temperaturas mais baixas. Os fluidos de perfuração são compostos por hidrocarbonetos de cadeias relativamente curtas e moléculas pequenas que não sofrem craqueamento nas temperaturas normalmente alcançadas nas unidades de dessorção térmica. No entanto, alguns aditivos de cadeia longa e moléculas grandes podem também estar presentes e sofrer craqueamento. Esses aditivos podem ainda agir como catalisadores promovendo o craqueamento de hidrocarbonetos de cadeia curta a temperaturas mais baixas, fato que impede a reutilização do fluido de perfuração.

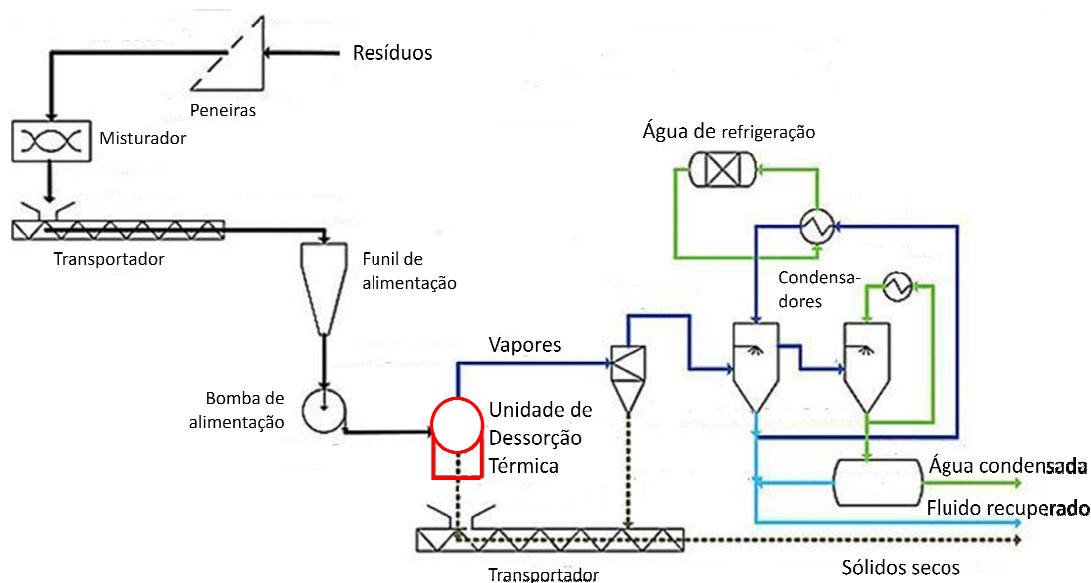


Figura 2.4 - Unidade de dessorção térmica convencional.

Segundo SEATON et al. (2006), a dessorção térmica pode alcançar um teor de hidrocarbonetos totais no cascalho de perfuração inferior a 1% em massa, o fluido recuperado quando esta técnica é utilizada pode estar adequado para reutilização como fluido de perfuração e a temperatura máxima operacional de uma unidade de dessorção térmica é de 343 °C.

2.3.2 Dessorção termomecânica

O processo de dessorção termomecânica (TCC^{RM}) tem algumas vantagens técnicas em relação aos sistemas tradicionais de dessorção térmica. O processo é baseado no aquecimento mecânico direto, o que elimina a necessidade de grandes superfícies e sistemas complexos de aquecimento. Turbinas ou motores elétricos (700 kWh) são aplicáveis para a geração de energia mecânica e isso torna possível o projeto de sistemas compactos que atendam aos mais altos níveis de segurança e padrões à prova de explosão. Os principais benefícios da dessorção termomecânica de um ponto de vista físico-químico são a temperatura de processo limitada e o curto tempo de retenção necessários para a completa remoção de fluido aderido aos sólidos. Isto reduz significativamente o risco de degradação térmica da lama de perfuração. Com base em resultados de cromatografia gasosa, não existem obstáculos para a reutilização do fluido recuperado através da dessorção termomecânica. Isso se torna possível devido ao mecanismo especial de geração de calor empregado nesse processo (THERMTECH AS, 2004).

No processo de dessorção termomecânica o calor é produzido internamente no material por forças de atrito gerado por intensa agitação. A combinação entre um tipo de moinho e a geração de calor no local (transformação de energia cinética em energia térmica) cria um ambiente que promove a evaporação instantânea da água e dos hidrocarbonetos (THERMTECH AS, 2010).

Outro benefício com o processo é que a intensa agitação quebra as partículas sólidas facilitando a difusão dos hidrocarbonetos. Isso reduz o tempo de residência na unidade de processo, o que torna possível o aumento da temperatura do processo sem induzir a degradação térmica do fluido de perfuração.

O calor do processo de dessorção termomecânica é produzido através da dissipação da energia mecânica fornecida pelo rotor do equipamento, como mostrado na Figura 2.5 (THERMTECH AS, 2006). O leito de material próximo às paredes do moinho é mantido fluidizado por uma combinação de vaporização flash de fluidos e um campo de força centrífuga gerado pela rotação turbulenta do material. A dimensão global de um reator é de

cerca de 1x1 m (comprimento interno x diâmetro interno). A massa total do leito limita-se a 200-400 kg de sólidos. Isto corresponde a um tempo médio de retenção de sólidos no reator de 6-12 minutos, mas apenas 15-30 segundos para o óleo (THERMTECH AS, 2004).

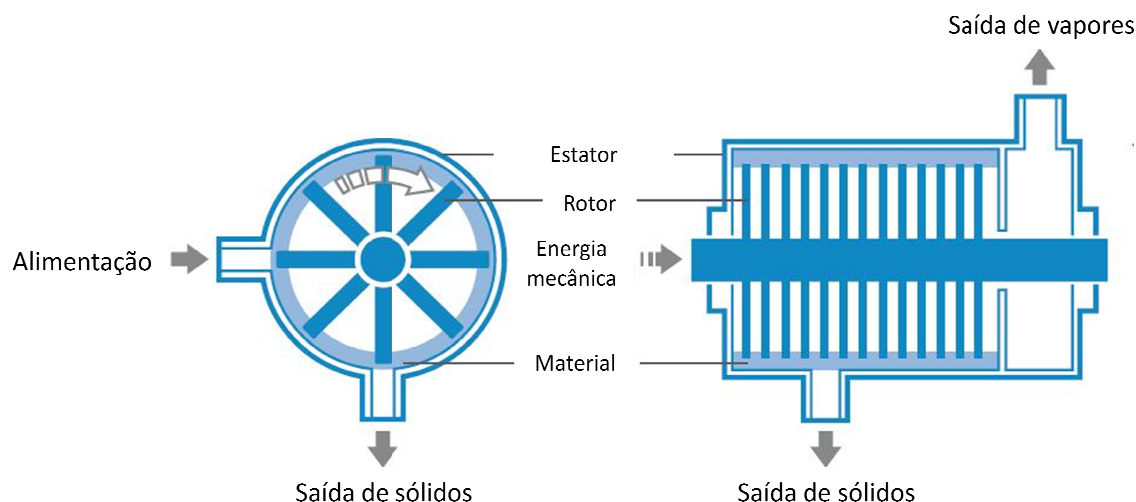


Figura 2.5 - Unidade de dessorção termomecânica (vista frontal e lateral).

A capacidade de qualquer processo térmico depende do teor de resíduo a ser eliminado, principalmente o teor de água, uma vez que a evaporação da água consome grande quantidade de energia. Uma unidade padrão de dessorção termomecânica tem capacidade de aproximadamente 3 t/h com um teor de sólidos/água/óleo de 70/15/15% em massa, mas pode chegar a 5t/h quando essa composição é de aproximadamente 90/5/5 (THERMTECH AS, 2010).

O fluxograma simplificado de um processo de dessorção termomecânica é apresentado na Figura 2.6 (THERMTECH AS, 2006). Os resíduos de perfuração devem ser previamente classificados para não danificar o equipamento e isso é feito por meio de uma tela de vibração. Para a alimentação mais suave e estável de material, bombas de pistões duplos tem sido a solução mais confiável. Devido ao projeto compacto e à quebra dos sólidos, quantidades significativas de partículas ultrafinas são carregadas pelos vapores. Estas partículas são eficientemente removidas por meio de um ciclone antes de os vapores serem condensados. Os sólidos livres de fluido de perfuração são descarregados através de válvulas e direcionados para fora da unidade de processo por meio de transportadores. Hidrocarbonetos e água são recuperados em um arranjo de condensadores. A água do mar, torres de resfriamento ou radiadores podem ser utilizados para resfriamento dos condensadores.

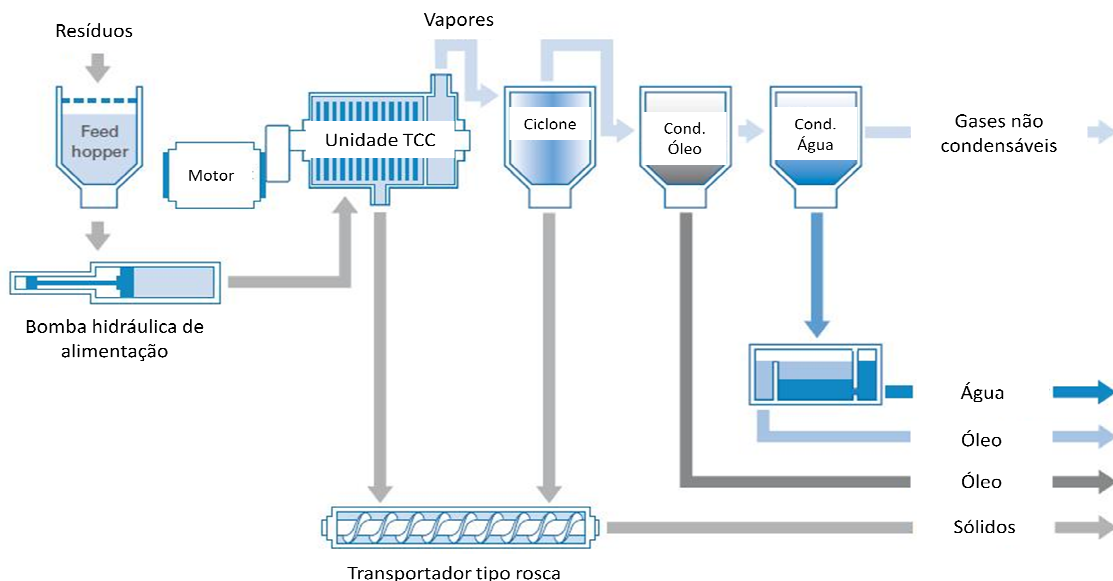


Figura 2.6 - Processo de dessorção termomecânica (TCCTM).

2.3.3 Microondas

No processamento térmico convencional, a energia é transferida através de condução, convecção e/ou radiação. Em contraste, a energia de microondas é fornecida diretamente aos materiais por meio da interação molecular com o campo elétrico formado por microondas. A distribuição de temperatura interna de um material sujeito a um aquecimento convencional é limitada pela sua condutividade térmica, enquanto no aquecimento por microondas os elementos do material são aquecidos individualmente e de forma instantânea. Uma unidade de aquecimento por microondas é mostrada na Figura 2.7.

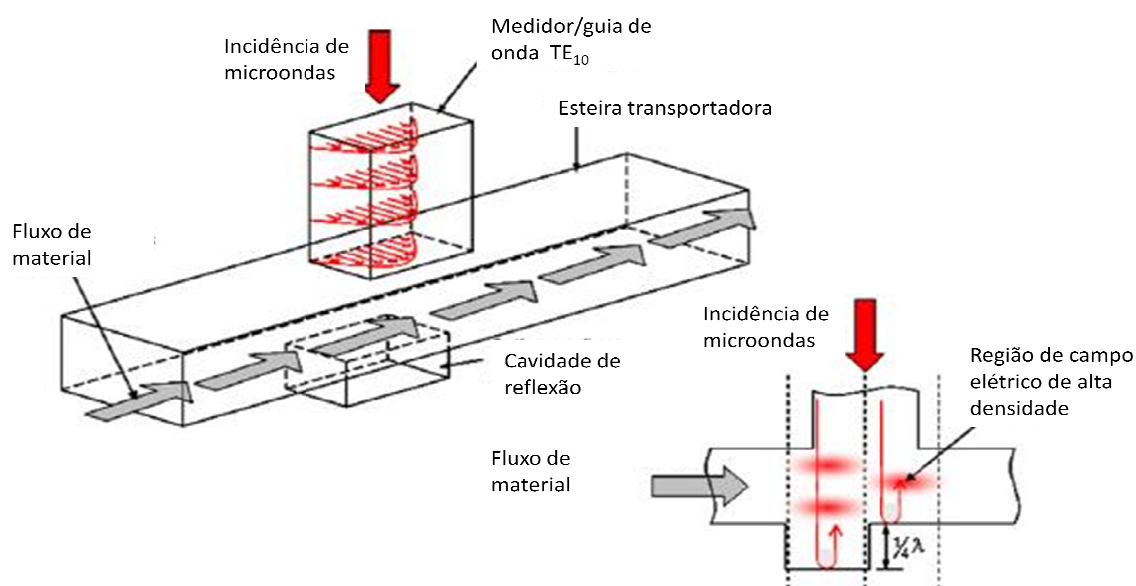


Figura 2.7 - Processo de utilização de microondas na limpeza de cascalho.

Em consequência, o tempo de aquecimento quando se utiliza microondas pode ser reduzido a menos de 1% do tempo requerido quando técnicas convencionais de aquecimento são utilizadas (MEREDITH, 1998 apud BARRANCO et al., 2010).

Existem três classificações genéricas para o comportamento de materiais na interação com um campo de microondas:

1. Transparente (materiais de baixa perda dielétrica) – as microondas passam pelo material com pouca absorção
2. Opaco (condutores) – as microondas são refletidas pelo material e não são absorvidas
3. Absorvente (materiais de alta perda dielétrica) – as microondas são absorvidas com base na intensidade do campo elétrico e o fator de perda dielétrica (MEREDITH, 1998 apud BARRANCO et al., 2010).

O processamento por microondas tem algumas vantagens para o tratamento de materiais que contêm uma mistura de material absorvente e transparente. As microondas são absorvidas pelas substâncias com alto fator de perda dielétrica (absorventes) e passam através dos componentes com baixo fator de perda dielétrica (transparentes), resultando em um aquecimento seletivo. Neste caso, economias significativas de energia são possíveis uma vez que o material dielétrico pode ser aquecido sem que ocorra o aquecimento de toda a matriz. Segundo CLARK et al. (2000), a potência absorvida por unidade de volume, ou densidade de potência (Pd), é dada pela Equação 2.1:

$$Pd = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' |E|^2 \quad (2.1)$$

onde f é a frequência de microondas, ε_0 a permissividade do espaço livre ($8,85 \times 10^{-12}$ F/m), ε'' é o fator de perda dielétrica e E a magnitude do campo elétrico (V/m). Da Equação 2.1 é evidente que a energia de microondas absorvida por um material dielétrico é proporcional ao quadrado da intensidade do campo elétrico. O projeto da cavidade do equipamento é um ponto crítico uma vez que esta pode gerar um campo elétrico muito bem definido em um volume relativamente pequeno (cavidade única), ou pode permitir que o campo elétrico abranja um volume muito maior, embora isso de certa forma comprometa a definição do campo elétrico (cavidade múltipla). A constante dielétrica, também é importante no processamento de microondas, uma vez que esta quantifica a capacidade de um material armazenar energia eletromagnética. Em contrapartida, o fator de perda dielétrica, ε'' , pode ser considerado como a capacidade do material de converter a energia eletromagnética em calor.

A constante dielétrica é fundamental na determinação das dimensões da estrutura do equipamento usado para processar determinado material, uma vez que ela determina o comprimento de onda das microondas.

Em resumo, existem duas vantagens principais na aplicação do aquecimento por microondas em processos de engenharia Segundo BARRANCO et al. (2009):

1. Aquecimento seletivo: a energia não precisa ser fornecida para aquecer todo o volume de material.
2. Aquecimento volumétrico: a energia pode ser dissipada instantaneamente através da superfície do material, superando limitações de transferência de calor.

O aquecimento seletivo garante uma eficiência energética do processo de aquecimento por microondas muito superior em comparação com os processos convencionais de aquecimento. O aquecimento volumétrico pode resultar em tempos de aquecimento muito curtos, levando a um equipamento compacto, com altas taxas de processamento e baixo tempo de residência.

O processo de aquecimento utilizando microondas não aquece diretamente os hidrocarbonetos presentes no fluido de perfuração, pois estes são essencialmente transparentes em frequências de microondas, uma vez que possuem um fator de perda dielétrica de 0,002. Por outro lado, a água presente nos poros dos sólidos de perfuração é aquecida e convertida em vapor. Esse vapor escapa fisicamente dos sólidos e arrasta os hidrocarbonetos presentes na superfície dos cascalhos. Outros mecanismos, tais como esgotamento e destilação, têm sido identificados como possíveis alternativas na descontaminação dos sólidos de perfuração. No entanto o mecanismo que ocorre no aquecimento por microondas é termodinamicamente mais atraente, pois, neste caso, a energia é necessária somente para aquecer a água, não sendo necessário o aquecimento do cascalho e nem mesmo do óleo aderido aos sólidos de perfuração.

Para manter a vantagem termodinâmica da técnica de microondas, a fase aquosa deve ser convertida em vapor antes que ocorra significativa transferência de calor para os sólidos. Para isso a taxa de aquecimento ($\Delta T/\Delta t$) deve ser a mais alta possível. Na passagem de testes de laboratório para um sistema de tratamento contínuo (*scale-up*), é imperativo que a densidade de potência seja maximizada para permitir a rápida conversão de água em vapor, sem que ocorra uma perda significativa de calor para o ambiente. A exigência de uma alta densidade de potência leva à exigência de um campo elétrico de alta resistência, que, por sua vez, determina o tipo de cavidade que será utilizada. Apesar das altas densidades de energia obtidas, cavidades únicas não podem ser usadas para a grande maioria das aplicações

industriais devido ao seu volume relativamente pequeno e não uniformidade do campo elétrico. Um conceito mais usual para aplicações na indústria e que ainda gera altas densidades de energia é a cavidade múltipla com um aplicador transversal de onda (BARRANCO et al. 2010).

Os níveis de potência necessários para alcançar um teor inferior a 1% de fluido no cascalho são aproximadamente o dobro do mínimo termodinâmico, é provável que esse fato seja devido ao fenômeno de reflexão da energia, a certa quantidade de energia que é consumida no superaquecimento da água acima 100 °C e à outra quantidade de energia que é inevitavelmente dissipada no aquecimento dos sólidos. Para remover o fluido do cascalho em processos convencionais de aquecimento utiliza-se muito mais energia, pois é necessário atingir temperaturas acima de 250 °C e aquecer toda a matriz rochosa contendo água e óleo.

Em uma base teórica, o processo de dessorção térmica convencional requer três vezes mais energia do que o processo de tratamento por microondas. A comparação também pode ser feita com processos de secagem. KEEY (1992) apud BARRANCO et al. (2009) relata que secadores convencionais consomem 1 kWh por kg de água retirada, o que equivale a 70 kWh por tonelada de resíduo, para remover a água dos detritos de perfuração. O processo de aquecimento por microondas pode remover quase totalmente a água e o óleo usando menos de 100 kWh por tonelada, o que é um indicativo da eficiência energética inerente à tecnologia de microondas em relação a processos convencionais de aquecimento.

No processo de microondas, o óleo e a água recuperados são separados por gravidade. Os resultados de BARRANCO et al. (2009) indicam que no geral a composição do fluido recuperado é semelhante a do fluido original e portanto a reutilização do mesmo não trará um significativo impacto sobre seu desempenho. No entanto, a presença de hidrocarbonetos leves indica alguma alteração nas cadeias dos hidrocarbonetos durante o processo de aquecimento, possivelmente devido à pirólise ou craqueamento. Embora haja algumas evidências de alterações químicas nos hidrocarbonetos, a temperatura na correia transportadora normalmente não excede 105 °C, portanto, qualquer degradação térmica é provavelmente devido a determinadas áreas dentro da cavidade com campo elétrico de alta intensidade.

2.3.4 Extração supercrítica

Uma vasta gama de processos de extração supercrítica têm sido estudada na última década. Infelizmente, um número limitado desses processos é passível à comercialização.

Para ser competitivo, o processo de extração supercrítica deve ter uma vantagem significativa sobre os processos de separação tradicional. O processo deve compensar o custo de capital necessário pra investir em equipamentos de alta pressão e, no caso de um solvente volátil (tal como o dióxido de carbono), o custo de compressão da alimentação. Para aplicações petroquímicas, o dióxido de carbono oferece a vantagem de ser um solvente não tóxico e principalmente de fácil recuperação.

Processos que utilizam solvente líquido geralmente exigem um sistema de destilação complexo para recuperar o solvente, tal processo pode ser substituído por uma extração supercrítica que recupera o solvente por uma simples redução de pressão. Solventes que têm boa seletividade e temperatura e pressão críticas relativamente baixas são os solventes mais eficientes. Para a remoção de contaminantes a base de hidrocarbonetos, este critério é prontamente atendido por solventes a base de hidrocarbonetos leves, tais como etano, propano e butano. Infelizmente, estes materiais geram problemas de segurança significativos, devido à sua alta volatilidade e grande potencial de explosão. Segundo ELDRIDGE (1996), a nova geração de HFC (hidrocarbonetos perfluorados) oferece alguns benefícios encontrados no uso de hidrocarbonetos leves e elimina algumas dessas preocupações com segurança.

2.3.5 Secagem a vácuo

O sistema de secagem de cascalho a vácuo utiliza no processo ar a alta velocidade e diferencial de pressão. Além disso, o fato do secador a vácuo ser instalado bem próximo às peneiras primárias elimina a necessidade de transporte do cascalho até o secador. Com isso, o sistema de secagem a vácuo (Figura 2.8) simplifica a ocupação física na plataforma (BAROID SURFACE SOLUTIONS™, 2007).

Segundo HALLIBURTON (2010), a economia com a instalação do sistema de secagem a vácuo gira em torno de 80% em relação aos secadores centrífugos. Esse equipamento exige significativamente menos manutenção, reduzindo a mão de obra na sonda e custos operacionais. Finalmente, o fato de o sistema ser composto por secadores múltiplos, cada um trabalhando com um agitador, deixa o processo menos vulnerável em caso de falha mecânica e com capacidade global superior a de um secador centrífugo.

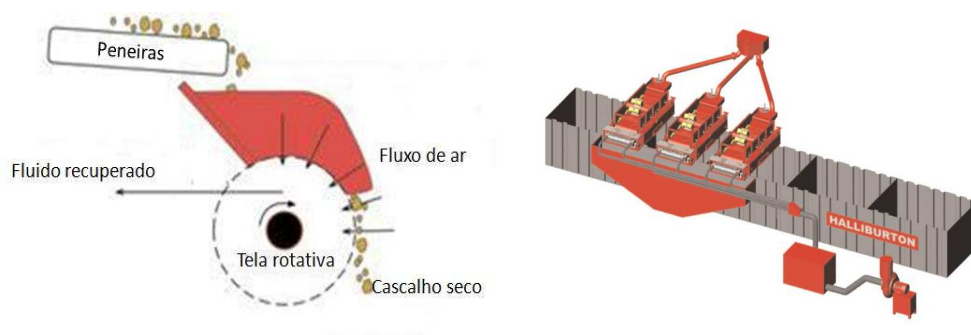


Figura 2.8 - Sistema de secagem a vácuo.

A grande desvantagem dos sistemas de secagem a vácuo é que o teor de hidrocarbonetos alcançado após secagem do cascalho não é inferior a 5 % em massa, ficando entre 5,1 e 6,7, valores muito próximos a legislação vigente hoje no Golfo do México para fluidos sintéticos (máx. 6,9%) e muito longe da europeia para fluidos a base de óleo (< 1%).

2.4 Fundamentos teóricos

2.4.1 Reologia

O termo reologia foi inventado pelo professor Bingham para definir o “estudo do escoamento ou deformação da matéria”. Assim, a reologia é o estudo do comportamento deformacional e do fluxo de matéria submetido a tensões, sob determinadas condições termodinâmicas, ao longo de um intervalo de tempo. Inclui propriedades como: elasticidade, viscosidade e plasticidade.

2.4.1.1 Conceitos importantes no estudo da reologia de fluidos

Alguns conceitos importantes no ramo da reologia estão apresentados a seguir (CHHABRA, 2007):

- *Viscosidade aparente*: é a medida da resistência interna ou fricção interna de uma substância ao fluxo quando submetida a uma tensão. Quanto mais viscosa a massa, mais difícil de escoar e maior o seu coeficiente de viscosidade.
- *Fluido newtoniano*: a viscosidade aparente é independente da taxa de deformação aplicada e é dependente somente da temperatura e pressão.
- *Fluido não newtoniano*: a viscosidade aparente varia com a taxa de deformação ou tensão de cisalhamento aplicada. Além disso, a viscosidade pode variar também com a geometria do fluxo, com o tempo de cisalhamento, com a cinemática da amostra, etc.

- *Fluidos independentes do tempo*: a relação entre tensão cisalhante e taxa de deformação é independente do tempo de cisalhamento. Esses fluidos podem ser classificados em: pseudoplásticos, visco-plásticos ou dilatante.

- *Pseudoplásticos*: a viscosidade aparente diminui com o aumento da taxa de deformação.

- *Visco-plásticos*: caracterizado pela presença de uma tensão crítica (τ_0), isto é, o escoamento ocorre somente a partir do momento que a tensão crítica é alcançada.

- *Dilatante*: a viscosidade aparente aumenta com o aumento da taxa de deformação.

A Figura 2.9 mostra o comportamento dos fluidos newtonianos e não newtonianos independentes do tempo.

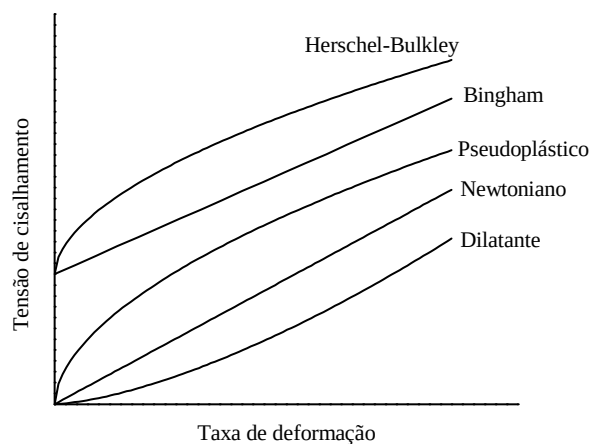


Figura 2.9 - Comportamento reológico de fluidos independentes do tempo.

- *Fluidos dependentes do tempo*: a relação entre tensão cisalhante e taxa de deformação varia com o tempo de cisalhamento. Esses fluidos podem ser classificados em: tixotrópicos ou reopéticos.

- *Tixotrópico*: a viscosidade aparente diminui com o tempo quando o material é cisalhado a uma taxa de deformação constante.

- *Reopético*: a viscosidade aparente aumenta com o tempo quando o material é cisalhado a uma taxa de deformação constante.

A Figura 2.10 mostra o comportamento dos fluidos dependentes do tempo de cisalhamento: tixotrópicos e reopéticos.

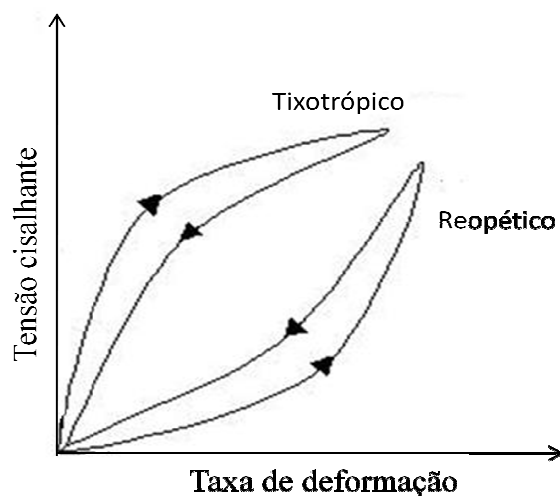


Figura 2.10 – Comportamento reológico de fluidos dependentes do tempo.

- *Visco-elásticos*: são fluidos que possuem propriedades elásticas e viscosas acopladas. Estas substâncias quando submetidas à tensão de cisalhamento sofrem uma deformação e quando esta cessa ocorre certa recuperação da deformação sofrida.

2.4.1.2 Reometria

A caracterização reológica de fluidos não newtonianos é amplamente conhecida por estar longe da simplicidade. Em alguns sistemas não newtonianos, como suspensões concentradas, medidas reológicas podem ser complicadas devido a propriedades mecânicas não lineares, dispersivas, dissipativas e tixotrópicas; e os desafios reométricos gerados por essas propriedades podem ser agravados por um limite de elasticidade aparente (CHHABRA, 2007). Os reômetros rotacionais de cilindros concêntricos são ferramentas extremamente importantes na caracterização reológica de fluidos com comportamento não newtoniano.

2.4.1.3 Modelos reológicos

Muitas expressões matemáticas de diversas formas e complexidade estão propostas na literatura para modelar o comportamento reológico de fluidos não newtonianos. Algumas dessas são tentativas simples de ajuste linear, fornecendo uma relação empírica entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação, enquanto outras têm alguma base teórica em mecanismos estatísticos. Vários modelos matemáticos são usados para descrever o comportamento da curva de fluxo de lamelas de perfuração. Os mais usuais são os modelos de Bingham, Power Law e Herschel-Bulkley (CHHABRA; RICHARDSON, 1999), por vezes utiliza-se também Robertson-Stiff (MACHADO, 2002):

- Bingham: viscosidade plástica (μ_p em Pa.s) e tensão crítica (τ_0 em Pa) - Equação

2.2.

$$\tau = \mu_p \dot{\gamma} + \tau_0 \quad (2.2)$$

- Power Law (PL): índice de comportamento (n), índice de consistência (K em Pa.s ^{n}) - Equação 2.3.

$$\tau = K(\dot{\gamma})^n \quad (2.3)$$

- Herschell-Bulkley (HB): índice de comportamento (n), índice de consistência (K em Pa.s ^{n}) e tensão crítica (τ_0 em Pa) - Equação 2.4.

$$\tau = K(\dot{\gamma})^n + \tau_0 \quad (2.4)$$

- Robertson-Sitff (RS): índice de comportamento (n), índice de consistência (K em Pa.s ^{n}) e correção da taxa de deformação (γ_0 em s⁻¹) - Equação 2.4.

$$\tau = K(\dot{\gamma} + \gamma_0)^n \quad (2.5)$$

Os modelos reológicos PL, HB e RS possuem dois parâmetros em comum, K e n , índice de consistência e índice de comportamento, respectivamente. O sentido físico desses parâmetros foi primeiramente determinado para o modelo de Power Law e Herschel-Bulkley, mas segundo MACHADO (2002) pode também ser estendido ao modelo Robertson-Stiff. O valor de n define o formato da curva. Nos modelos de Bingham e Herschel-Bulkely, τ_0 representa a tensão crítica, isto é, tensão mínima a ser alcançada antes que o fluido comece a escoar ou entre em movimento. O terceiro parâmetro do modelo Robertson-Stiff, γ_0 , segundo MACHADO (2002), é uma correção da taxa de deformação.

2.4.2 Granulometria

A análise granulométrica classifica um conjunto de partículas baseado em sua distribuição de tamanho. Várias técnicas como peneiramento, microscopia óptica ou eletrônica, foto-sedimentação, contadores Coulter e difração de raio laser podem ser utilizadas na determinação do tamanho de partículas (ALLEN, 1997). A descrição matemática de distribuições granulométricas acumulativas pode ser feita através de modelos empíricos de distribuição. Alguns modelos clássicos, largamente utilizados para representar dados experimentais de distribuição granulométrica estão descritos na seção 2.4.2.2.

2.4.2.1 Técnica de difração de raio laser

A difração laser é uma técnica analítica bastante utilizada para a medida de distribuição de tamanhos de bolhas, gotas e partículas dispersas no ar ou água, suspensões, emulsões e aerossóis. O método baseia-se no fato de que o laser ao passar através de uma suspensão contendo a amostra sofre difração e o ângulo dessa difração é inversamente proporcional ao tamanho das partículas. O instrumento consiste de uma fonte laser de comprimento de onda fixo (tipicamente 0,63 μm), um detector apropriado (geralmente uma célula fotoelétrica) com uma série de detectores discretos e algum meio de dispersão das partículas através do feixe de luz (técnicas estão disponíveis para a suspensão de partículas tanto em líquidos quanto em gases).

Para relacionar o ângulo de difração com o tamanho da partícula os primeiros equipamentos utilizavam a teoria de Fraunhofer, a qual pode gerar grandes erros uma vez que o índice de refração do material particulado e do meio onde esse se encontra disperso são apenas aproximações. Instrumentos mais modernos utilizam a teoria de Mie para relacionar a difração da luz com o tamanho das partículas. Essa teoria cobre um range maior de leitura de tamanho de partículas (0,1-2000 μm) e é possível de ser utilizada quando o índice de refração tanto do material particulado quanto do meio de dispersão são conhecidos (RHODES, 2008).

2.4.2.2 Modelos de distribuição granulométrica acumulativa

Existem na literatura modelos estatísticos simples que podem ser usados para ajustar os dados provenientes de uma análise granulométrica. Os três modelos utilizados no presente trabalho estão apresentados a seguir segundo HOLDICH (2002).

- *Rosin-Rammler-Bennet* (RRB): esse modelo é caracterizado por possuir dois parâmetros ajustáveis e é uma função simples que relaciona diretamente o diâmetro d_p da partícula com a fração mássica de partículas (X) com diâmetro menor que d_p , conforme mostra a Equação 2.6.

$$X = 1 - \exp\left(-\left(\frac{d_p}{d_{63,2}}\right)^n\right) \quad (2.6)$$

Onde n e $d_{63,2}$ são os parâmetros do modelo e representam, respectivamente, o formato da curva (X versus d_p) e o diâmetro correspondente a um *undersize* de 63,2%.

A representação gráfica do modelo RRB pode assumir duas formas dependendo do valor do parâmetro n , como mostra a Figura 2.11:

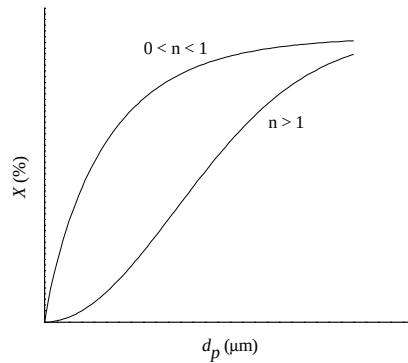


Figura 2.11 - Curvas de distribuição granulométrica segundo o modelo RRB.

- *Sigmóide* : o ajuste Sigmóide também apresenta dois parâmetros ajustáveis, conforme mostra a Equação 2.7 :

$$X = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{50}}{d_p} \right)^n} \quad (2.7)$$

Onde n e d_{50} são os parâmetros do modelo e representam, respectivamente, o formato da curva (X versus d_p) e o diâmetro correspondente a um *undersize* de 50%. A representação gráfica do modelo Sigmóide fornece sempre uma curva em “S”, mostrada na Figura 2.12:

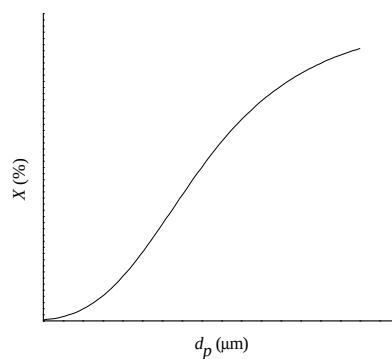


Figura 2.12 - Curva de distribuição granulométrica segundo o modelo Sigmóide.

- *Gates-Gaudin-Shumann (GGS)* : de forma análoga aos anteriores o modelo GGS é um modelo de dois parâmetros conforme mostra a Equação 2.8.

$$X = \left(\frac{d_p}{d_{100}} \right)^n \quad (2.8)$$

Onde n e d_{100} são os parâmetros do modelo e representam, respectivamente, o comportamento da curva (X versus d_p) e o diâmetro máximo da amostra de partículas.

A representação gráfica do modelo GGS pode assumir três formas, dependendo do valor do parâmetro n , como mostra a Figura 2.13:

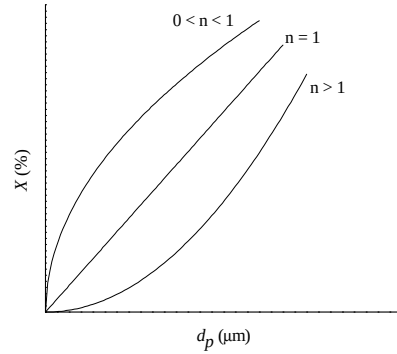


Figura 2.13 - Curvas de distribuição granulométrica segundo o modelo GGS.

2.5 Panorama do secador de cascalho

O resíduo de perfuração consiste em fluido de perfuração, cascalho com fluido associado e, em menor extensão, fluidos diversos tais como excesso de cimento, espaçadores, e uma variedade de outros fluidos. A quantidade de resíduo de perfuração depende de vários fatores. Estes incluem o diâmetro do poço perfurado, a eficiência do sistema de controle de sólidos, a capacidade do fluido de tolerar sólidos e inibir a degradação ou dispersão dos mesmos e a quantidade de fluido retido no cascalho.

Segundo ASME (2005), a Equação 2.9 é uma expressão simples que fornece a quantidade de cascalho com fluido associado (cascalho molhado):

$$S = \frac{\varepsilon HV}{F_s} \quad (2.9)$$

Onde:

S = volume de cascalho molhado, em barris.

ε = eficiência do controle de sólidos, expressa como uma fração.

HV = volume total do poço, em barris.

F_s = fração de sólidos na corrente de descarte.

A fração de sólidos na corrente de saída do poço varia entre 30 e 50% em volume. O sistema de controle de sólidos, não importa quão bom ele seja, não é capaz de separar completamente o fluido do cascalho. Da mesma forma, o sistema de controle de sólidos não

consegue retirar do sistema de circulação a totalidade de cascalho provinda do poço. Isto significa que, com o tempo, os sólidos irão se acumular no sistema de circulação.

Técnicas de tratamento de resíduos diferem dos procedimentos de eliminação ou descarte pelo fato de que as primeiras modificam ou separam as propriedades dos resíduos, mas os resíduos ainda precisam ser depositados em algum lugar. Técnicas de tratamento visam remover o fluido, reduzindo a mobilidade de contaminantes ou modificando as propriedades dos resíduos. Muitas técnicas de tratamento têm sido desenvolvidas e a maioria delas visa reduzir a quantidade de fluido retida no cascalho de modo a permitir que esse seja depositado no fundo do mar. Outras técnicas visam encapsular o cascalho contaminado a fim de impedir a sua lixiviação para o ambiente.

ASME (2005), afirma que das diversas técnicas de tratamento de resíduos, existem três que são de maior uso e importância. A primeira é a centrifugação (separação sólido-líquido): separação mecânica de líquidos e sólidos provenientes da perfuração (fluido e cascalho). A segunda é a dessorção térmica: eliminação do fluido retido no cascalho a partir do uso de calor (aquecimento). A terceira é a estabilização: técnica de encapsulamento dos contaminantes presentes no cascalho para evitar a lixiviação.

A centrífuga vertical foi desenvolvida em 1938 para ser usada em secagem de carvão e foi adaptada a indústria de petróleo em 1998. Desde então o secador de cascalho vem sendo largamente utilizado no controle de sólidos em sondas de perfuração e sofreu algumas modificações nos últimos anos, a fim de melhor atender a indústria petrolífera. Esse equipamento é importante em projetos *offshore* e *onshore* onde a recuperação de fluido de perfuração e o enquadramento às leis ambientais são prioridade (M-I SWACO, 2001).

A secagem do cascalho é muitas vezes referida como uma limpeza secundária dos sólidos. A recuperação do fluido de perfuração leva a uma redução de 10 a 25% no volume de resíduo de perfuração, assim, a secagem tornou-se então um procedimento padrão em sistemas fechados de controle de sólidos. O cascalho proveniente das peneiras primárias e do *Mud Cleaner* do sistema de controle de sólidos possui uma concentração de fluido de 8 a 12% em massa. Essa concentração é significativamente alta em relação ao mínimo permitido no litoral dos Estados Unidos e da Europa, e cada vez mais em outros lugares do mundo. Assim, tem havido um aumento substancial no interesse em reduzir essa concentração pelo uso de diferentes equipamentos. A Figura 2.14 mostra o cascalho na saída das peneiras e após passar pelo processo de secagem.



Figura 2.14 - Comparação entre o cascalho molhado (a) - 12% - e seco (b) - 3%.

As centrífugas verticais e horizontais compõem aproximadamente 80% das unidades de secagem de cascalho em uso hoje. Velocidades usuais de rotação são de 300 a 1200 rpm e a taxa de alimentação do equipamento pode chegar a 60 t/h. O tempo de retenção dos sólidos na centrífuga, a geometria da tela e a rotação do motor variam muito entre os diferentes tipos de secadores. Normalmente, quanto maior a rotação maior a força centrífuga alcançada e maior a capacidade do equipamento.

A legislação tem sido a força motriz para o aumento do uso de secadores de cascalho, juntamente com o uso de fluidos de perfuração sintéticos. A centrífuga é até agora o único equipamento no mercado capaz de reduzir confiavelmente o teor de fluido aderido ao cascalho abaixo de 4 %, frente à variedade de sólidos processados durante a perfuração, e ainda garantir a qualidade do fluido que será reutilizado.

Uma das questões encontradas na secagem de cascalho é a grande quantidade de partículas carregadas pelo fluido recuperado nesse equipamento. Os efluentes das operações de secagem apresentam sempre sólidos que atravessam a tela fina. Uma maneira de contornar esse inconveniente é passar o fluido de perfuração recuperado através de uma ou mais centrífugas decantadoras, procedimento que leva a concentração de sólidos no fluido a um teor abaixo do limite máximo permitido pelo sistema ativo de circulação.

O maior obstáculo encontrado na secagem dos sólidos provenientes da perfuração é processar em um fluxo contínuo a grande variedade tanto de volume de lama quanto de forma e natureza do cascalho. O segundo aspecto mais problemático das operações de secagem é lidar com a descarga "*on stream*", isto é, a estabilidade do equipamento, níveis de fluido e fluxos de alimentação (ASME, 2005).

O secador de cascalho melhora a relação custo-benefício, reduzindo a quantidade de resíduos e elevando a quantidade de fluido de perfuração recuperado. Esse equipamento minimiza o volume de resíduos, diminuindo drasticamente o custo de descarte e assegurando o cumprimento dos regulamentos ambientais. A Figura 2.15 mostra uma comparação entre o teor de fluido nos sólidos descartados nas peneiras e no secador, bem como o teor legal estabelecido pela Agência Americana de Proteção Ambiental (US EPA): igual ou inferior a 6,9% em massa.

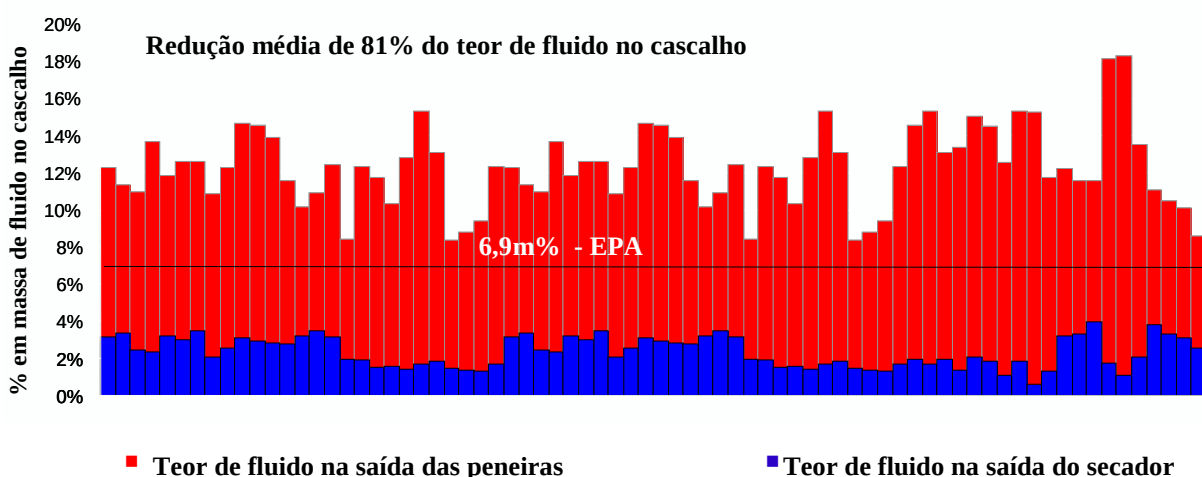


Figura 2.15 - Comparação entre teor de fluido no cascalho das peneiras e do secador.

Em plataformas *onshore*, o secador de cascalho também é utilizado para reduzir a quantidade de resíduos e torná-los menos tóxicos, uma vez que o teor de fluido de perfuração aderido ao cascalho é reduzido. Neste tipo de plataforma o descarte de cascalho contaminado com fluido sintético é proibido e, geralmente, é destinado a aterros ou diques industriais de responsabilidade das empresas petrolíferas. Atualmente algumas técnicas de reciclagem desse tipo de resíduo têm sido desenvolvidas em parceria entre empresas do setor e universidades.

Por fim, o secador de cascalho foi desenvolvido para processar fluidos não aquosos, uma vez que, além desses fluidos não serem tóxicos, as argilas hidratadas presentes em fluidos aquosos levariam ao “selamento” da tela desse equipamento impedindo o processo de filtração centrífuga.

CAPITULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, o sistema de controle de sólidos em sondas de petróleo e gás, bem como, os equipamentos que compõem esse processo, foram descritos com o intuito de esclarecer o procedimento de amostragem, a qual foi feita em campo em diversos pontos ao longo do processo de controle de sólidos. Também estão descritos neste capítulo, o fluido de perfuração utilizado, os procedimentos adotados para caracterização da lama e dos sólidos de perfuração e, por fim, o secador de cascalho, peça chave na redução dos contaminantes presentes nos resíduos de perfuração, além de permitir a máxima recuperação do fluido.

3.1 Controle de sólidos em sondas de perfuração de petróleo e gás

As operações de perfuração de poços de petróleo empregam a lama de perfuração para preenchimento do poço com vários objetivos já descritos anteriormente. Esse procedimento, por sua vez, gera uma mistura sólido-líquido (fluido + cascalho) que dever ser separada. Desta forma, o objetivo dos sistemas modernos de controle de sólidos em sondas de perfuração é a redução global de custo removendo de forma eficiente os sólidos de perfuração e minimizando a perda de fluido aderido a estes. Além disso, este objetivo deve ser atingindo respeitando-se a legislação ambiental quanto ao descarte dos resíduos gerados nesse processo e essa tem sido uma grande preocupação por parte das indústrias petrolíferas.

O tamanho dos sólidos de perfuração presentes no fluido varia bastante com as condições operacionais e com a litologia, indo desde cascalho a colóides, tal fato leva à necessidade da utilização de vários tipos de equipamentos no processo de separação sólido-líquido. Para se atingir o objetivo, cada equipamento removerá uma parte dos sólidos por meio de peneiramento, decantação ou centrifugação. Cada equipamento é projetado para separar partículas de uma determinada faixa de tamanho de maneira eficiente e econômica. Ressalta-se que o ótimo funcionamento de um equipamento depende do seu projeto, instalação, operação e manutenção.

A eficiência na remoção de sólidos pode ser computada de duas maneiras: eficiência de sólidos removidos propriamente dita e eficiência na conservação de líquido. Quanto maior a fração de sólidos removidos, maior a eficiência, ou seja, quanto maior a fração de sólidos no efluente de descarte, melhor é a eficiência de remoção. Comumente, a eficiência de um sistema de controle de sólidos também pode ser referenciada a partir da comparação do

volume final acumulado de fluido de perfuração quando se utiliza o sistema de separação com o volume de fluido que seria utilizado para se conseguir o mesmo teor de sólidos por meio de diluição (PETROBRAS, 2008).

3.1.1 Peneiras vibratórias

As peneiras primárias têm um papel fundamental na eficiência global do sistema, pois são os primeiros equipamentos a partir do *flowline*. Por isso, são ditas a primeira linha de defesa do sistema de separação de sólidos. O bom dimensionamento na quantidade e qualidade dessas peneiras evita a sobrecarga dos hidrociclones (desareiaadores e dessiltadores) e equipamentos seguintes. Desta forma, sem um peneiramento adequado do fluido de perfuração neste estágio inicial de separação, a eficiência e efetividade de todo o sistema de controle de sólidos da sonda fica seriamente comprometida.

As peneiras devem ser projetadas para processar todo o volume circulante de fluido e possuir preferencialmente as menores aberturas de tela compatíveis com a operação. Em campo são utilizadas peneiras inclinadas e vibratórias, fatores que, juntamente com o tipo de tela e tamanho de abertura, interferem diretamente na eficiência desses equipamentos.

As seguintes características são importantes na escolha da tela a ser utilizada (BRICE, 2006; PETROBRAS, 2008):

- Camadas: as telas de um equipamento podem ser construídas com uma ou mais camadas. As telas de camada única têm aberturas que são regulares em tamanho e forma. As telas com mais de uma camada têm malha diferente em cada camada, ou seja, estas telas têm aberturas que variam muito em tamanho e forma.

- Mesh: definido como o número de aberturas por polegada.
- Abertura: distância entre dois fios consecutivos da tela, normalmente é medido em polegadas ou microns. Telas de mesmo mesh podem ter aberturas diferentes a depender do diâmetro do fio utilizado na fabricação da tela. Quanto menor o diâmetro do fio maior a abertura da tela e maior serão as partículas que passarão através da mesma. É a abertura da tela, e não o mesh, que determina o tamanho das partículas que serão separadas pela tela.

- Porcentagem de área aberta: porcentagem da área da tela que não é bloqueada pelos fios da mesma. Para um mesmo mesh, quanto maior o diâmetro do fio utilizado na tela menor será essa porcentagem.

O objetivo de se fazer vibrar a tela de uma peneira é promover a queda das partículas sólidas liberando a área sobre a tela. A vibração leva à rápida separação da lama e dos sólidos, reduzindo a quantidade de lama aderida aos sólidos. Para a máxima eficiência, os sólidos

sobre a superfície da tela devem permanecer ali por um tempo mínimo de residência relacionado à inclinação e tipo de vibração das peneiras. Alguns dispositivos usam movimento elíptico e outros usam movimento linear para aumentar a eficiência. O efeito combinado da tela e vibração resulta na separação e remoção de partículas de grandes dimensões a partir de lama de perfuração. As peneiras são, e provavelmente continuarão sendo, a primeira linha de defesa de um sistema de controle de sólidos corretamente projetado. Sem o monitoramento adequado do fluido de perfuração durante esta etapa inicial de remoção dos sólidos, certamente haverá redução da eficiência e eficácia de todos os equipamentos a jusante das peneiras no processo de controle de sólidos.

No mercado existem as peneiras primárias cujas telas variam geralmente entre 10 e 40 mesh, e as peneiras de alto desempenho, as quais operam com telas finas chegando a mais de 200 mesh. Nas operações de perfuração de poços de petróleo as peneiras primárias são adequadas para a perfuração de superfície e para profundidades rasas e intermediárias quando auxiliadas pelos demais equipamentos separadores de sólidos. Para poços profundos e quando se utiliza um fluido de perfuração com custo elevado, as peneiras de alto desempenho são preferidas. No *Mud Cleaner* utilizam-se peneiras de alto desempenho, uma vez que os sólidos separados nessa etapa possuem um diâmetro médio inferior aos sólidos da primeira etapa (PETROBRAS, 2008).

3.1.2 Hidrociclones

Hidrociclones são equipamentos comumente utilizados no processo de separação sólido-fluido. Nesses equipamentos, a pressão da alimentação é transformada em força centrífuga que atua dentro do cone para separar as partículas de acordo com a Lei de Stokes. Esses equipamentos se tornaram importantes no sistema de controle de sólidos, pois removem de maneira eficiente partículas menores que a abertura das telas das peneiras e por serem equipamentos simples, de fácil manutenção e sem partes móveis.

O hidrociclone consiste de uma parte cilíndrica ligada à uma parte cônica com uma pequena abertura no fundo para descarga do *underflow*, uma abertura maior no topo para descarga do *overflow* através da formação de um “vortex” interno e uma abertura lateral para alimentação no corpo do equipamento próximo ao topo. A lama de perfuração é alimentada no hidrociclone sob pressão a partir de uma bomba centrífuga. A carga de fluido à entrada do equipamento leva à rotação das partículas no interior do cone, gerando acentuada força centrífuga. Com isso forma-se um movimento em espiral descendente, arrastando as partículas maiores e mais pesadas para a saída inferior do equipamento denominada