

Fernando Superbi Guerreiro

**Estudo experimental do peneiramento vibratório
em batelada de suspensão diluída de rocha
fosfática: determinação do teor de umidade de
material retido, eficiência granulométrica e
diâmetro de corte**

Uberlândia

2015

Fernando Superbi Guerreiro

**Estudo experimental do peneiramento vibratório
em batelada de suspensão diluída de rocha
fosfática: determinação do teor de umidade de
material retido, eficiência granulométrica e
diâmetro de corte**

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 Separação.

Universidade Federal de Uberlândia – UFU
Faculdade de Engenharia Química
Programa de Pós-Graduação

Orientador: Carlos Henrique Ataíde

Uberlândia
2015

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

- G934e Guerreiro, Fernando Superbi, 1990-
2015 Estudo experimental do peneiramento vibratório em batelada de suspensão diluída de rocha fosfática: determinação do teor de umidade de material retido, eficiência granulométrica e diâmetro de corte / Fernando Superbi Guerreiro. - 2015.
 67 f. : il.
- Orientador: Carlos Henrique Ataíde.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.
Inclui bibliografia.
1. Engenharia química - Teses. 2. Poços de petróleo - Perfuração - Teses. 3. Separação (Tecnologia) - Teses. I. Ataíde, Carlos Henrique. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. III. Título.

CDU: 66.0

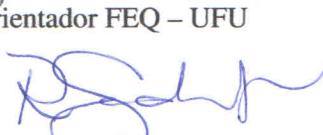
Fernando Superbi Guerreiro

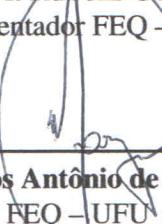
**Estudo experimental do peneiramento vibratório
em batelada de suspensão diluída de rocha
fosfática: determinação do teor de umidade de
material retido, eficiência granulométrica e
diâmetro de corte**

Dissertação de Mestrado submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química.

Trabalho Aprovado. Uberlândia, 26 de março de 2015.


Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde
Orientador FEQ – UFU


Prof. Dr. Rubens Gedraite
Co-orientador FEQ – UFU


Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Barrozo
FEQ – UFU


Prof. Dr. Cláudio Roberto Duarte
FEQ – UFU


Prof. Dr. Curt Max de Ávila Panisset
Petrobras – Salvador

Dedico este trabalho aos meus queridos familiares por sempre acreditarem no meu potencial.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que, pela sua graça, me deu saúde e iluminou meu caminho para que eu iniciasse uma nova etapa da minha vida e que permite que eu esteja terminando essa fase iniciada a dois anos atrás.

Aos meus pais e a minha avó, que sempre me deram apoio para correr atrás do que eu achasse que fosse o melhor pra mim, além de me ensinarem o caminho certo para meu amadurecimento.

Deixo minhas sinceras palavras em agradecimento ao Prof. Dr. Rubens Gedraite, por ter sido o precursor deste projeto e por ter me dado a oportunidade de iniciá-lo junto a Faculdade de Engenharia Química. Agradeço também por ter me ajudado na parte experimental, além de sempre me aconselhar quando eu mais precisava.

Ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde por aceitar enfrentar o desafio de iniciar um projeto pioneiro na Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Química, pela orientação dada ao longo do mestrado que fez com que eu crescesse como pessoa e por sempre confiar em meu profissionalismo.

Gostaria também de agradecer duas pessoas da Pós-Graduação que contribuíram de maneira significativa para a execução deste projeto: Isabele Bicalho pela ajuda dada para a manipulação de alguns equipamentos utilizados e José Lucas Mognon pelo compartilhamento de informações relevantes ao trabalho.

Agradeço também a CAPES e a PETROBRAS por viabilizarem os recursos necessários ao desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

“Existem muitas hipóteses em ciência que estão erradas. Isso é perfeitamente aceitável, elas são a abertura para achar as que estão certas”.

– Carl Sagan

RESUMO

O estudo detalhado do funcionamento de uma peneira vibratória, contemplando a relação de causa e efeito entre as diversas variáveis operacionais envolvidas, assume papel de destaque no que se refere à separação sólido-líquido. O objetivo geral desta dissertação foi o estudo inicial do peneiramento vibratório, que pode ser estendido para o controle de sólidos em unidade de perfuração de poços de petróleo, sendo que o objetivo específico deste trabalho foi a avaliação dos efeitos da abertura da tela, concentração volumétrica de sólidos na alimentação e vibração (ou força-g) da peneira sobre o teor de umidade dos sólidos retidos, a eficiência granulométrica global de separação e o diâmetro de corte de cada tela utilizando uma suspensão de rocha fosfática diluída em água e goma xantana. Um planejamento de experimentos 3^k foi criado para a execução dos experimentos, onde as aberturas das telas foram 95, 106 e 130 μm , concentração volumétrica de sólidos na alimentação de 1,0; 2,0 e 3,0% e força-g de intensidade 1,00; 2,25 e 3,50. Para a realização dos experimentos, foi utilizada uma peneira vibratória em escala piloto que processava 159 litros de suspensão em 18 minutos. Os resultados indicaram que o mínimo teor de umidade foi alcançado com a tela de 95 μm de abertura, concentração volumétrica de sólidos de 3% e força-g de intensidade 1,0; enquanto que para a eficiência granulométrica global a condição máxima foi obtida com tela de abertura 106 μm , concentração de 1% e vibração de 1,0 g. O ponto ótimo de operação contemplando alta eficiência e baixo teor de umidade foi alcançado com a tela de 95 μm de abertura, concentração volumétrica entre 2 e 3% e a vibração menos intensa (1,0 g). Para o diâmetro de corte os resultados obtidos para cada tela indicaram que o seu valor diminuiu com o emprego da força-g mais intensa. Os resultados obtidos no trabalho desenvolvido são importantes para compreender os principais aspectos operacionais na separação sólido-líquido utilizando peneiras vibratórias.

Palavras-chave: Peneiramento via úmida. Força-g. Abertura da tela.

ABSTRACT

The detailed study of the screen operation considering cause and effect amongst several involved operational variables takes a prominent position regarding the solid-liquid separation. The general objective of this dissertation was the initial study of the vibrating screening that can be extended to the solid control in drilling rigs and the specific goal of this work was to assess the effects of screen aperture, volumetric concentration of solids in the feed and vibration (or g-force) upon the moisture of the retained material, the overall granulometric efficiency of separation and the cut diameter by using a suspension of phosphatic rock and xanthan gum diluted in water. An experimental design 3^k was created to execute the experiments, where the screen apertures were 95, 106 and 130 μm , volumetric concentration of solids in the feed 1, 2 and 3% and g-force of magnitude 1.00, 2.25 and 3.50. For the performance of the experiments, a pilot scale vibrating screen was used that processed 159 liters in 18 minutes. The results showed that the minimum moisture was obtained with the screen of 95 μm , volumetric concentration of 1% and vibration of magnitude 1.0 g, whereas for the overall granulometric efficiency the maximum condition was with 106 μm screen aperture, concentration of 1% and vibration of 1.0 g. The optimal point covering high efficiency and low moisture was achieved with 95 μm screen aperture, volumetric concentration between 2 and 3% and the least intense vibration(1.0 g). For the cut diameter the results obtained for each screen showed that its value decreased with the use of more intense vibration. The results obtained in the developed work are important to understand the main operational aspects in the solid-liquid separation by using shale shakers.

Keywords: Wet screening. G-force. Screen aperture.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Esquema representativo do fluxo do fluido de perfuração desde a saída até o retorno ao poço, isento de cascalho	1
Figura 1.2 – Esquema de uma unidade típica de controle de sólidos	2
Figura 2.1 – Peneira vibratória da empresa <i>M-I Swaco</i>	10
Figura 2.2 – <i>Mud cleaner</i> pertencente à empresa <i>Marindco</i>	11
Figura 2.3 – Esquema de funcionamento de um hidrociclone. Adaptado de GN Solids Control (2010)	12
Figura 2.4 – Esquema de uma centrífuga decantadora. Adaptado de Sweco (2013)	13
Figura 2.5 – Descrição típica de uma peneira vibratória. Adaptado de: <i>American Association of Drilling Engineers - AADE</i> (1999)	15
Figura 2.6 – Configurações para cestas de peneiras vibratórias. Adaptado de AADE (1999)	16
Figura 2.7 – Tipos de movimentos vibratórios: (A) Elíptico Desbalanceado; (B) Circular; (C) Linear e (D) Elíptico Balanceado	17
Figura 2.8 – Curva de ponto de corte da operação e curva de separação ideal. Adaptado de Larson (2007)	21
Figura 2.9 – Formas de abertura quadrada e retangular. Fonte: AADE (1999)	23
Figura 2.10–Telas de peneiramento em camadas. Fonte: AADE (1999)	23
Figura 3.1 – Distribuição acumulada de tamanho de partícula da rocha fosfática utilizada e do cascalho utilizado por Pereira (2013)	30
Figura 3.2 – Esquema para o balanço de massa realizado	32
Figura 3.3 – Unidade para realização dos experimentos: ① - tanque de 500 L com agitador; ② - calha de alimentação; ③ - tela de peneiramento; ④ - balde para o material retido; ⑤ - tanque de descarga de 200 L; ⑥ - Bomba centrífuga; ⑦ - motovibradores; ⑧ - acelerômetro; ⑨ - placa de aquisição de dados e ⑩ - inversor de frequência	34
Figura 3.4 – Motovibradores usados para impor movimento vibracional à peneira	34
Figura 3.5 – Acelerômetro utilizado para aquisição de dados referente à vibração imposta à peneira	35
Figura 3.6 – Placa para aquisição de sinal do acelerômetro e geração de sinal para o inversor de frequência	35
Figura 3.7 – Inversor de frequência utilizado para controlar a rotação dos motovibradores	35
Figura 3.8 – Painel frontal criado em <i>Labview</i> para operação da unidade	36
Figura 3.9 – Diagrama de blocos criado em <i>Labview</i> para operação da unidade	36
Figura 3.10–Calha utilizada para melhor distribuição de alimentação na peneira	37
Figura 3.11–Saídas da peneira: material retido à esquerda e passante à direita	37

Figura 4.1 – Superfícies de resposta para o teor de umidade do material retido	42
Figura 4.2 – Superfícies de resposta para a eficiência granulométrica	43
Figura 4.3 – Superfícies de resposta para o diâmetro de corte referente à três telas	45
Figura 4.4 – Relação entre eficiência granulométrica global e diâmetro de corte referente à corrente de material retido	46
Figura C.1 – Distribuição dos resíduos para o teor de umidade do material retido após a eliminação de 11 experimentos	63
Figura C.2 – Distribuição dos resíduos para o teor de umidade da regressão com os valores médios da resposta	63
Figura C.3 – Distribuição dos resíduos para a eficiência granulométrica após a eliminação de 13 experimentos	64
Figura C.4 – Distribuição dos resíduos para a eficiência granulométrica com os valores médios da resposta	64
Figura C.5 – Distribuição dos resíduos para o diâmetro de corte da tela de 125 <i>mesh</i> após a eliminação de 5 experimentos	65
Figura C.6 – Distribuição dos resíduos para o diâmetro de corte da tela de 125 <i>mesh</i> com os valores médios da resposta	65
Figura C.7 – Distribuição dos resíduos para o diâmetro de corte da tela de 150 <i>mesh</i> após a eliminação de 6 experimentos	66
Figura C.8 – Distribuição dos resíduos para o diâmetro de corte da tela de 150 <i>mesh</i> com os valores médios da resposta	66
Figura C.9 – Distribuição dos resíduos para o diâmetro de corte da tela de 175 <i>mesh</i> após a eliminação de 4 experimentos	67
Figura C.10 – Distribuição dos resíduos para o diâmetro de corte da tela de 175 <i>mesh</i> com os valores médios da resposta	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Matriz de planejamento fatorial a três níveis utilizada neste trabalho.	28
Tabela 3.2 – Correspondência entre as variáveis e suas formas codificadas	29
Tabela 3.3 – Características das telas utilizadas neste trabalho	29
Tabela 3.4 – Correspondência entre massa de rocha fosfática e densidade para cada concentração volumétrica	31
Tabela 4.1 – Valores experimentais das variáveis respostas: médias e desvios para cada experimento do planejamento fatorial	40
Tabela A.1 – Quadro de ANOVA para o ajuste da regressão. Adaptado de Barros et al. (2001)	54
Tabela A.2 – Dados da distribuição granulométrica da rocha fosfática utilizada neste trabalho	58
Tabela A.3 – Dados de distribuição granulométrica do cascalho utilizado por Pereira (2013)	59
Tabela B.1 – Respostas experimentais para todos os experimentos realizados – em triplicata	60

LISTA DE SÍMBOLOS

F	Vazão mássica de alimentação da peneira vibratória
D	Vazão mássica de material retido pela peneira
U	Vazão mássica de material passante pela peneira
x_F	Fração mássica de sólidos na alimentação
x_D	Fração mássica de sólidos na vazão de material retido
x_U	Fração mássica de sólidos na vazão de material passante
E_D	Eficiência de coleta em relação ao material retido
E_U	Eficiência de coleta em relação ao material passante
Y	Distribuição acumulativa de material particulado
d_p	Tamanho de partícula
Y_F	Distribuição acumulativa de material particulado da alimentação
Y_U	Distribuição acumulativa de material particulado da corrente de material passante
Y_D	Distribuição acumulativa de material particulado da corrente de material retido
G_D	Grade de eficiência ou eficiência granulométrica de coleta dependente do tamanho de partícula
d_{50}	Diâmetro de corte, que representa o tamanho de partícula relacionado à eficiência de coleta de 50%
ϕ	Tamanho da abertura de uma tela de peneiramento
η_U	Eficiência granulométrica em relação a corrente de material passante
η_D	Eficiência granulométrica em relação a corrente de material retido
η	Eficiência granulométrica global
$\#M$	Número de <i>mesh</i> de uma tela de peneiramento
d_w	Diâmetro do fio de uma tela de peneiramento
$\psi(\%)$	Porcentagem de área aberta de uma tela
ϕ_r	Comprimento da abertura na direção r
ϕ_s	Comprimento da abertura na direção s perpendicular à r

d_{wr}	Diâmetro do fio perpendicular à direção r
d_{ws}	Diâmetro do fio perpendicular à direção s
C	Condutância de uma tela de peneiramento
μ	Viscosidade aparente do fluido
Q	Vazão de processamento da tela
A_d	Área disponível para peneiramento
ΔP	Queda de pressão através da tela
A	Amplitude de oscilação relacionado à vibração de uma peneira vibratória
w	Massa dos contra-pesos dos motovibradores
e	Excentricidade dos contra-pesos
W	Massa do conjunto cesta mais material sobre a peneira
F_P	Força resultante referente ao movimento vibratório
a_P	Aceleração vibracional de pico de uma peneira
a	Aceleração do movimento vibratório de uma peneira
u	Deslocamento vertical do movimento vibratório de uma peneira
f	Frequência de vibração
t	Tempo de vibração
Γ	Força-g ou adimensional de vibração
g	Aceleração da gravidade
C_V	Concentração volumétrica de rocha fosfática na alimentação
m_{RF}	Massa de rocha fosfática
V_{susp}	Volume de suspensão a ser peneirada
ρ_{RF}	Massa específica da rocha fosfática
ρ_{susp}	Massa específica da suspensão
ρ_{RF}	Massa específica da água
H	Teor de umidade do material retido
G_{obj}	Função objetivo para localização do ponto ótimo de operação
G_η	Função normalizada relativa à eficiência granulométrica
G_H	Função normalizada relativa ao teor de umidade

η_{MIN}	Eficiência granulométrica mínima predita pelo ajuste
η_{MAX}	Eficiência granulométrica máxima predita pelo ajuste
H_{MIN}	Teor de umidade mínimo predito pelo ajuste
H_{MAX}	Teor de umidade máximo predito pelo ajuste
x_1	Variável codificada referente ao número de <i>mesh</i> das telas
x_2	Variável codificada referente à concentração volumétrica da suspensão de água, rocha fosfática e goma xantana
x_3	Variável codificada referente à força-g aplicada para a vibração da peneira vibratória
y_i	Valor da resposta i observada
β_0	Parâmetro correspondente à média dos valores preditos
$\beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$	Parâmetros relacionados aos efeitos linear, quadrático e de interação, respectivamente, das variáveis de entrada dos experimentos
\hat{y}_i	Valor da resposta i predita pela equação de ajuste
b_0	Estimador de mínimos quadrados do parâmetro β_0
b_i, b_{ii}, b_{ij}	Estimadores de mínimos quadrados dos parâmetro β_0, β_{ii} e β_{ij} respectivamente
ε_i	Erro gerado pelo ajuste da equação preditora da resposta dos experimentos
\bar{y}	Média dos valores observados da resposta
R^2	Coeficiente de determinação que avalia a qualidade do ajuste da equação de regressão
N	Número de experimentos
P	Número de parâmetros da equação de ajuste, com exceção de b_0
F_{CALC}	Estatística de teste relacionada à distribuição <i>F-Fischer</i>
F_{TAB}	Valor tabelado obtido pela distribuição <i>F-Fischer</i> para o teste de hipóteses sobre a adequabilidade de uma equação de ajuste
α	Nível de significância em teste estatístico
ν_1	Número de graus de liberdade da equação de ajuste
ν_2	Número de graus de liberdade dos resíduos
t_{CALC}	Estatística de teste relacionada à distribuição <i>t-Student</i>
s_{bi}	Erro padrão associado à estimativa de b_i

t_{TAB}	Valor tabelado obtido pela distribuição <i>t-Student</i> para o teste de hipóteses sobre a significância de um parâmetro em questão
\underline{x}	Vetor das variáveis de entrada codificadas
\underline{b}	Vetor dos estimadores de efeito linear
B	Matriz com elementos dos estimadores de efeitos quadrático e de interação
x_0	Vetor correspondente ao ponto estacionário
\hat{y}_0	Valor da resposta predita no ponto estacionário
ω_i	Variável canônica criada após a translação da origem até o ponto estacionário
λ_i	Raíz característica i associada à matriz B
\underline{z}	Vetor criado para auxiliar a análise canônica
M	Matriz dos autovetores associados às raízes características da matriz B
$\underline{\omega}$	Vetor das variáveis canônicas
\underline{m}_i	Autovetor associado à raiz característica i

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Justificativa	2
1.2	Objetivo	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Fluidos de perfuração	4
2.1.1	Características e finalidades dos fluidos de perfuração	4
2.1.2	Propriedades dos fluidos de perfuração	6
2.1.3	Tipos de fluidos de perfuração	8
2.2	Unidade para controle de sólidos e disposição dos resíduos gerados	9
2.2.1	Controle de sólidos	9
2.2.1.1	Peneira vibratória	10
2.2.1.2	<i>Mud cleaner</i>	11
2.2.1.3	Centrífuga decantadora	12
2.2.2	Disposição de resíduos	13
2.3	Peneiramento Vibratório	14
2.3.1	Avaliação de desempenho do peneiramento vibratório	18
2.3.1.1	Capacidade	18
2.3.1.2	Vida útil da tela	18
2.3.1.3	Teor de fluido no material de descarga	19
2.3.1.4	Eficiência Granulométrica Global	19
2.3.2	Variáveis operacionais que afetam o desempenho do peneiramento	22
2.3.2.1	Tela de peneiramento	22
2.3.2.2	Vibração	25
2.3.2.3	Inclinação da cesta	26
2.3.2.4	Teor de sólidos na alimentação	27
2.3.2.5	Densidade e viscosidade do fluido	27
2.3.2.6	Tamanho e formato das partículas	27
3	MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1	Planejamento de experimentos	28
3.2	Material para peneiramento	29
3.3	Respostas avaliadas nos experimentos	31
3.3.1	Localização do ponto ótimo entre teor de umidade e eficiência granulométrica	32

3.4	Unidade Experimental	33
3.5	Metodologia para realização dos experimentos	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1	Respostas Observadas	39
4.2	Análise de significância: Teor de Umidade e Eficiência Granulométrica .	41
4.2.1	Ponto ótimo entre umidade e eficiência granulométrica	44
4.3	Análise de significância: Diâmetro de Corte	44
4.4	Relação entre d_{50} e eficiência granulométrica	46
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	48
5.1	Conclusões	48
5.2	Sugestões	49
	Referências	50
	Anexo A: Metodologia estatística aplicada no tratamento de resultados experimentais	53
	Apêndice A: Dados de distribuição granulométrica	58
	Apêndice B: Respostas experimentais – completo	60
	Apêndice C: Gráficos de resíduos gerados pelas regressões	63

1 INTRODUÇÃO

A descoberta de uma jazida de petróleo em uma nova área é uma tarefa que envolve um longo e dispendioso estudo e análise de dados geofísicos e geológicos das bacias sedimentares. A identificação de uma área favorável à acumulação de petróleo é realizada através de metodologia específica, desenvolvida por profissionais da área da Geologia e/ou da Geofísica, que atuando conjuntamente, conseguem indicar o local mais propício para a perfuração. Somente após exaustivos estudos do comportamento das diversas camadas do subsolo é que se decide propor a perfuração de um poço, que é a etapa que mais investimentos exigem em todo o processo de prospecção.

Na perfuração de um poço de petróleo, as rochas são perfuradas pela ação da rotação e do peso aplicados a uma broca existente na extremidade da coluna de perfuração, a qual consiste basicamente de comandos (tubos de paredes espessas) e tubos pesados (transição entre camadas e tubos de perfuração).

Numa circulação normal, o fluido de perfuração é bombeado através da coluna de perfuração até a broca, retornando pelo espaço anular até a superfície, e trazendo consigo os cascalhos¹. Na superfície, o fluido deve ser encaminhado até uma unidade de controle de sólidos para a remoção destes cascalhos e assim poder ser bombeado para receber tratamento a fim de que suas propriedades físicas possam ser readequadas para seu retorno ao poço (Figura 1.1).

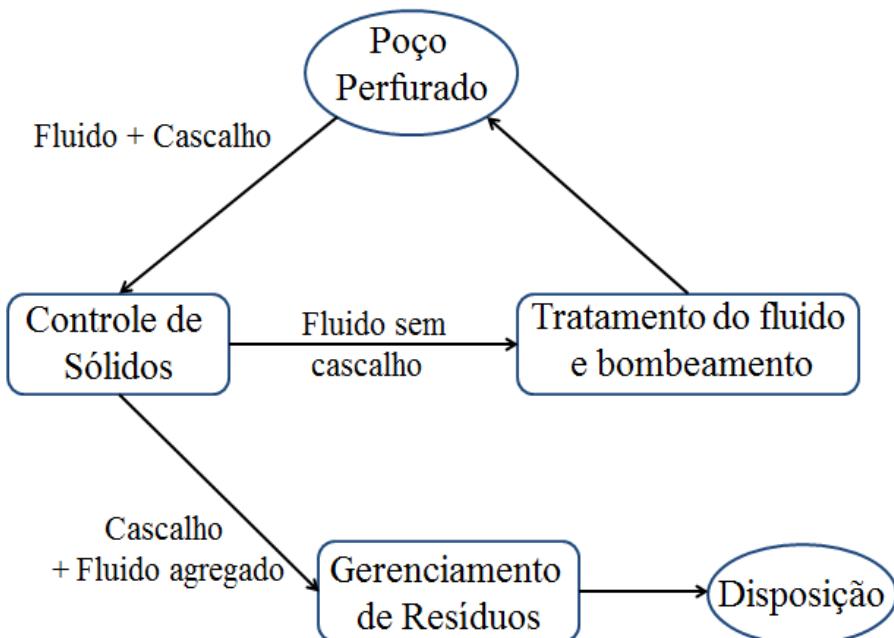


Figura 1.1 – Esquema representativo do fluxo do fluido de perfuração desde a saída até o retorno ao poço, isento de cascalho

¹São denominados cascalhos os sólidos gerados pela broca durante a perfuração de poços de petróleo e gás.

A recuperação do fluido de perfuração agregado aos cascalhos gerados é um assunto de suma importância na operação de sondas de perfuração de poços de petróleo, sob o ponto de vista ambiental e econômico. Os equipamentos utilizados para a separação sólido-líquido em uma unidade típica de controle de sólidos são divididos em três grupos sequenciais: peneiras vibratórias, bateria de hidrociclos (desareiadores e dessiltadores) e centrífuga decantadora (Figura 1.2).

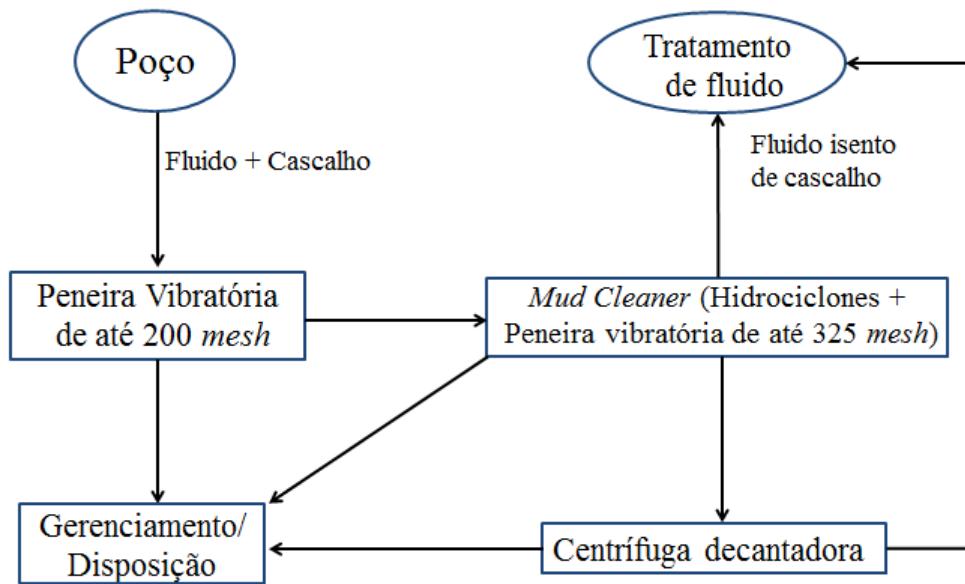


Figura 1.2 – Esquema de uma unidade típica de controle de sólidos

1.1 Justificativa

A melhoria do desempenho de uma unidade de tratamento de fluido de perfuração típica consiste na identificação das variáveis de processo passíveis de análise e posterior melhoria de rendimento. Tipicamente, este processo envolve o emprego de sistemas automatizados de monitoração e controle. A realidade praticada nas plataformas de perfuração prioriza a maximização do funcionamento ininterrupto do sistema, devido ao elevado valor das multas contratuais vigentes. Contudo, a questão do desempenho é tratada em uma base empírica, na qual a experiência profissional dos operadores de campo é o único recurso empregado.

O desempenho de uma unidade de controle de sólidos típica é fortemente influenciado pelo funcionamento da peneira vibratória. Considerada a primeira linha de defesa na unidade, é extremamente desejável a sua otimização, pois seu desempenho afetará os equipamentos subsequentes, além da necessidade em se maximizar a recuperação de fluido agregado ao cascalho de forma a minimizar o impacto ambiental e também maximizar a eficiência de peneiramento de forma a minimizar perdas de aditivos importantes contidos no fluido. Neste cenário, o estudo detalhado do funcionamento de uma peneira vibratória, contemplando a relação de causa e efeito entre as diversas variáveis operacionais envolvidas assume papel de destaque.

A motivação deste trabalho é levantar dados e informações que sejam a base para trabalhos futuros que estudem a peneira vibratória no controle de sólidos de maneira peculiar e também na busca pela automação e otimização deste processo. Os resultados deste trabalho podem também ser úteis no estudo de técnicas alternativas que adequem os cascalhos de perfuração às leis ambientais.

1.2 Objetivo

O objetivo geral desta dissertação foi o estudo inicial da separação sólido-líquido em peneiras vibratórias que pode ser estendido para o controle de sólidos em unidade de perfuração de poços de petróleo. O objetivo específico do trabalho é a avaliação dos efeitos das seguintes variáveis: abertura da tela da peneira, concentração volumétrica de sólidos na alimentação e parâmetro de vibração da peneira (força-g) sobre as variáveis respostas teor de umidade dos sólidos retidos pela tela da peneira, eficiência granulométrica global de separação e diâmetro de corte da tela da peneira.

Os resultados alcançados neste trabalho são importantes para compreender os principais aspectos operacionais na separação sólido-líquido utilizando peneiras vibratórias. Nos sistemas de controle de sólidos em unidades de perfuração de poços de petróleo e gás, as condições operacionais são mais críticas que aquelas utilizadas neste estudo, notadamente no que diz respeito à concentração de sólidos e a reologia da suspensão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

ESTE capítulo foi subdividido em três seções. A seção 2.1 traz informações pertinentes aos fluidos de perfuração (características, finalidades, propriedades e tipos). A seção 2.2 retrata a unidade de controle de sólidos para fluido de perfuração mais usual, relacionando-a com a disposição dos resíduos sólidos de perfuração nos ambientes *offshore* e *onshore*. E, finalmente, a seção 2.3 diz respeito ao primeiro equipamento da unidade de separação: a peneira vibratória, dando ênfase às formas de avaliar seu desempenho e a influência de algumas variáveis operacionais no funcionamento da mesma.

2.1 Fluidos de perfuração

O fluido de perfuração é visto de diferentes maneiras por diferentes autores. A *American Society of Mechanical Engineers - ASME* (2005) o define como qualquer fluido usado em operação de perfuração que possa ser bombeado da superfície até o fundo do poço, saindo pela broca, e retornando para a superfície através do ânulo. Já Thomas (2004) o considera como uma mistura complexa de sólidos, líquidos, produtos químicos e, por vezes, até de gases. Do ponto de vista químico pode assumir aspecto de suspensão, dispersão coloidal ou emulsão, dependendo do estado físico dos componentes. Do ponto de vista físico, o fluido de perfuração assume comportamento de fluidos não-newtonianos, ou seja, a relação entre a taxa de cisalhamento e a taxa de deformação não é constante (MACHADO, 2002).

O fluido de perfuração é o elemento vital na construção do poço. Durante todo o processo, um sistema incluindo tanques de armazenamento de fluidos de alta capacidade, bombas de alta vazão, coluna de perfuração e broca, sistemas de limpeza de fluidos entre outros, atuam em um circuito contínuo na intenção de manter a integridade das formações geológicas atravessadas e a segurança do pessoal de perfuração. O cascalho é separado do fluido de perfuração através de um processo de separação sólido-líquido e, depois de devidamente tratado, retorna ao poço, operando assim em circuito fechado.

2.1.1 Características e finalidades dos fluidos de perfuração

Os fluidos de perfuração devem ser especificados de forma a garantir uma perfuração controlada, rápida e segura. Assim, é desejável que o fluido apresente as seguintes características (THOMAS, 2004):

- Ser estável quimicamente;
- Facilitar a separação dos cascalhos na superfície;
- Manter os sólidos em suspensão quando estiverem em repouso;
- 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;
- Apresentar custo compatível com a operação;
- Ser inerte em relação às rochas que estão sendo perfuradas.

Os fluidos de perfuração têm papel fundamental para uma operação eficiente e desempenham uma série de finalidades essenciais:

- **Remover do fundo do poço os cascalhos gerados pela broca:** 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 coluna de perfuração e deve ter a capacidade de trazer os cascalhos do fundo do poço à superfície, limpando a área de trabalho das brocas (PEREIRA, 2010);
- **Controle da pressão e estabilidade do poço:** o fluido é projetado para exercer pressão hidrostática sobre as formações rochosas, de modo a evitar influxo de fluidos indesejáveis (*kick*²) e estabilizar as paredes do poço, visando assim evitar acidentes. Entretanto a pressão exercida não pode ser muito alta para não danificar o poço;
- **Estabilizar as formações rochosas:** é preciso manter as formações expostas ao trabalho da broca estáveis. Isso é feito por meio da manutenção da pressão do fluido de perfuração acima da pressão do fluido contido nos poros das rochas. Há uma tendência natural de que o fluido de perfuração penetre nos poros da formação, o que é minimizado com a utilização de aditivos nos fluidos. As formações rochosas com alto conteúdo de argila tendem a ser lavadas e removidas pela água. Essas formações exigem um fluido inibidor para manter o poço estável e evitar a remoção pela ação da água ou ainda a utilização de um fluido base não aquosa;
- **Lubrificar a coluna de perfuração e resfriar a broca:** quando a broca gira em contato com a rocha, há atrito e geração de calor (American Oil Company - AMOCO (1994)). Da mesma forma, o canal de perfuração sofre com o atrito das formações rochosas e também pelos esforços na tubulação através da torção. O fluido tem a função de lubrificar e de resfriar estes equipamentos para aumentar a vida útil da broca e diminuir os esforços das tubulações.

Outras finalidades do fluido de perfuração são: manter o novo poço aberto até que o revestimento de aço possa ser cimentado, minimizar o impacto ambiental e melhorar a segurança operacional.

²*kick* é a entrada de fluidos da formação para o interior do poço quando a pressão hidrostática é menor que a pressão dos fluidos confinados nos poros das formações (SANTOS, 2013). Um *kick* não combatido com segurança implicará em um fenômeno conhecido como *blowout*, resultando em perda da sonda, poluição ao meio ambiente e perda de vidas.

2.1.2 Propriedades dos fluidos de perfuração

Alguns testes são feitos em campo a fim de se avaliar a qualidade do fluido de perfuração, isto é, algumas de suas propriedades físicas e químicas. 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 (THOMAS, 2004). O controle das propriedades dos fluidos usados e os cuidados tomados durante o processo de perfuração é de suma importância para que tal operação tenha sucesso.

As propriedades físicas controladas são medidas em todos os tipos de fluidos. As mais importantes e frequentemente medidas são: a densidade, os parâmetros reológicos (viscosidade e forças géis), parâmetros de filtração e o teor de sólidos. As propriedades químicas a serem determinadas dependem do tipo de fluido. As determinadas com mais frequência são o pH e a concentração de bentonita ou sólidos ativos.

Densidade

Na sonda de perfuração, a densidade é responsável pelo controle da pressão hidrostática no interior do poço. Os limites de variação de densidade dos fluidos para perfurar uma determinada fase são definidos pela pressão de poros (que é a pressão atuante no fluido que se encontra nos poros da rocha) como limite mínimo e pela pressão de fratura (que é a pressão para o qual a rocha se rompe) como limite máximo. Quando for necessário aumentar a densidade do fluido, normalmente adiciona-se baritina (BaSO_4) que tem densidade de $4,25 \text{ g/cm}^3$, enquanto que a densidade dos sólidos de perfuração é em torno de 2,60 (THOMAS, 2004). Para se reduzir a densidade dos fluidos à base de água, dilui-se com água e a diluição dos fluido de base não aquosa com a próprio componente principal desse fluido.

Parâmetros reológicos

A Reologia é o estudo da deformação e escoamento da matéria. A viscosidade de um fluido, propriedade reológica caracterizada por sua resistência ao fluxo, tem efeito importante sobre a limpeza do poço. Em geral maiores viscosidades implicam melhor transporte de cascalhos para a superfície. A viscosidade de um fluido pode ser alterada por aditivos argilosos como bentonita sódica, ou por polímeros naturais como goma xantana ou CMC (carboximetilcelulose).

A maioria dos fluidos de perfuração adquirem um estado semi-rígido quando estão em repouso e voltam a adquirir um estado de fluidez quando em movimento. Essa característica possibilita aos cascalhos cortados pela broca permanecerem suspensos, impedindo a sedimentação deles sobre a broca, o que ocasionaria a prisão da coluna de perfuração (M-I SWACO, 2001). Assim, é proposital que o fluido assuma comportamento não-Newtoniano.

A força gel, outro parâmetro de natureza reológica, indica o grau de gelificação devido à

interação elétrica entre as partículas dispersas. A força gel inicial mede a resistência inicial para colocar o fluido em fluxo e a força gel final mede a resistência do fluido ao reiniciar o fluxo quando este fica um certo tempo em repouso.

Parâmetros de filtração

A capacidade do fluido de perfuração em formar uma camada de partículas sólidas úmidas, denominada de reboco (*mud cake*), sobre as rochas permeáveis expostas pela broca é de fundamental importância para o sucesso da perfuração do poço. Para formar o reboco, deve haver o influxo da fase líquida do fluido do poço para a formação. Este processo é conhecido como 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, o filtrado, invade a rocha. O filtrado e a espessura do reboco são dois parâmetros medidos rotineiramente para definir o comportamento do fluido quanto à filtração (THOMAS, 2004).

Teor de sólidos

O teor de sólidos, cujo valor deve ser mantido o mínimo possível, é uma propriedade que deve ser controlada com rigor porque o seu aumento implica no aumento de outras propriedades, tais como densidade, viscosidade e forças gêis. Também aumenta a probabilidade de ocorrência de desgaste dos equipamentos de circulação e fratura das formações devido à elevação da pressão hidrostática. O tratamento do fluido para reduzir o teor de sólidos pode ser preventivo ou corretivo. O tratamento preventivo consiste em inibi-lo, física ou quimicamente, para evitar a dispersão dos cascalhos. No tratamento corretivo, pode-se fazer uso de equipamentos extratores de sólidos, como peneiras vibratórias, hidrociclones e centrifugadores, ou também diluir o fluido.

Potencial hidrogeniônico - pH

O pH dos fluidos de perfuração é medido através de papéis indicadores ou de peagâmetros, e é geralmente mantido no intervalo alcalino baixo (pH entre 7 e 10) com o objetivo de reduzir a taxa de corrosão dos equipamentos bem como manter a emulsão estável. Para se reduzir a acidez de um fluido de perfuração, adiciona-se hidróxido de sódio (NaOH).

Teor de bentonita ou de sólidos ativos

Bentonita é a designação dada uma mistura de argilas geralmente impura, de grãos muito finos que incha na presença de água. A propriedade de inchamento faz a bentonita útil como um selante impermeabilizante das paredes do poço. O teste do azul de metíleno ou MBT é uma análise volumétrica por adsorção que serve como indicador da quantidade de sólidos ativos ou bentoníticos no fluido de perfuração. Ele mede a capacidade de troca catiônica das argilas e sólidos ativos presentes.

2.1.3 Tipos de fluidos 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 majoritário da fase contínua ou dispersante. Neste critério, eles são classificados em fluidos de base aquosa e fluidos de base não aquosa. Há ainda a utilização de gás, que pode ser ar, nitrogênio ou fluidos aerados, porém essa prática é pouco utilizada.

Fluidos de base aquosa

Para este tipo de fluido, a água é a fase contínua e o principal componente de qualquer fluido de base aquosa. A escolha por se utilizar um fluido à base aquosa 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. (THOMAS, 2004).

A principal função da água é prover o meio de dispersão para os materiais coloidais. Estes, principalmente argilas e polímeros, controlam a viscosidade, limite de escoamento, forças géis e filtrado em valores adequados para conferir ao fluido uma boa taxa de remoção de sólidos de perfuração.

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.

Segundo Schaffel (2002), a grande desvantagem dos fluidos aquosos é o “inchamento” das argilas hidrofílicas presente nas formações rochosas. Este fenômeno pode provocar a instabilidade do poço e resultar em dificuldades durante a construção do poço. Alguns problemas operacionais tais como aumento do torque, *drag* e até prisão da coluna, também podem decorrer do “inchamento” das argilas. A hidratação das argilas é minimizada pelo emprego de aditivos, e ainda assim, o problema em questão não é completamente sanado.

Fluidos de base não aquosa

Os fluidos de perfuração são de base não aquosa quando a fase contínua ou dispersante é constituída por uma fase não aquosa, geralmente composta de hidrocarbonetos líquidos. São frequentemente divididos em fluidos base óleo e base sintética. Os fluidos a base óleo são derivados do petróleo e incluem óleo diesel, óleo mineral e parafinas lineares. Os fluidos sintéticos são derivados de reações químicas, 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).

O principal uso de fluidos base não aquosa é em perfurações de folhelhos altamente reativos, a fim de se 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 devido à sua capacidade de

impedir a hidratação de argilas.

O custo de se utilizar fluido base óleo ou sintética é muito alto quando comparado a um sistema convencional de fluido à base aquosa. No entanto, os fluidos de base não aquosa podem ser recuperados e reutilizados, tornando seu uso mais atrativo.

A grande desvantagem dos fluidos não aquosos é o maior impacto ambiental causado pelo descarte dos mesmos em ambiente marinho. Hoje, com as crescentes preocupações ambientais, a utilização desses fluidos é proibida ou severamente restringida em muitos países. Em algumas regiões, as leis para disposição de cascalhos contendo certo teor de base não aquosa são tão severas que os custos de contenção, transporte e eliminação pode inviabilizar a utilização deste tipo de fluido.

Utilizando como fluido base substâncias químicas sintéticas, os fluidos sintéticos oferecem menor impacto ambiental e produção de menor volume de resíduos de perfuração. Este tipo de fluido foi desenvolvido como uma alternativa às limitações de desempenho dos de base aquosa e em resposta às restrições ambientais impostas aos fluidos 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).

2.2 Unidade para controle de sólidos e disposição dos resíduos gerados

Esta subseção aborda a separação de sólidos gerados pela perfuração visando o reaproveitamento do fluido de perfuração e posterior disposição desses sólidos.

2.2.1 Controle de sólidos

As operações de perfuração de poços de petróleo empregam o fluido de perfuração para remover os cascalhos de dentro do poço. Esse procedimento, por sua vez, gera uma mistura de fluido e cascalho que deve ser separada. Desta forma, o objetivo dos sistemas 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 atingido respeitando-se a legislação ambiental quanto ao descarte dos resíduos gerados nesse processo já que essa tem sido uma grande preocupação por parte das indústrias petrolíferas.

Para se atingir o objetivo, cada equipamento do sistema de controle de sólidos removerá uma parte dos sólidos por meio de peneiramento ou separação centrífuga. Cada equipamento é projetado para separar partículas de uma determinada faixa de tamanho do líquido de maneira econômica. Ressalta-se que o ótimo funcionamento de um equipamento vai depender 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. Quanto maior a fração de sólidos no efluente de descarte, melhor é a eficiência de remoção. Ambos os aspectos devem ser considerados.

O bom projeto de um sistema de separação de sólidos prevê a instalação de vários tipos de equipamentos em série. 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 predecessor antes deve estar operando de acordo com a sua capacidade. Caso contrário, haverá uma sobrecarga e a propagação desta para o equipamento seguinte e assim por diante, ocasionado uma perda de eficiência global do sistema.

2.2.1.1 Peneira vibratória

As peneiras vibratórias têm um papel fundamental na eficiência global do sistema, pois são os primeiros equipamentos no controle de sólidos. O bom dimensionamento, na quantidade e qualidade dessas peneiras, evita a sobrecarga dos equipamentos seguintes. Elas devem ser projetadas para processar todo o volume circulante de fluido e possuir, preferencialmente, as menores aberturas de tela compatíveis com a operação.

O propósito da vibração é o aumento da capacidade de processamento do material alimentado à peneira. Esta ação causa uma rápida separação, reduzindo a quantidade de líquido perdido com os sólidos. Além disso, a vibração promove o transporte das partículas sólidas liberando a área sobre a tela. Visando a máxima eficiência, os sólidos devem ser transportados sobre superfície da tela por um padrão pré-determinado de movimento elíptico, circular ou linear para aumentar a eficiência de separação e reduzir o tamponamento das aberturas da tela. A Figura 2.1 apresenta a imagem de uma peneira vibratória típica para peneiramento de fluido de perfuração.



Figura 2.1 – Peneira vibratória da empresa *M-I Swaco*

A seção 2.3 descreverá em detalhes a operação de peneiramento vibratório.

2.2.1.2 *Mud cleaner*

Os *mud cleaners* foram desenvolvidos no início dos anos 70 para remover os sólidos de perfuração finos dos fluidos adensados sem uma perda excessiva de barita e fluido. Após a remoção do cascalho maior nas peneiras, o fluido é bombeado para o *mud cleaner* por meio de uma bomba centrífuga. Estes dispositivos utilizam uma combinação de hidrociclos e peneira vibratória com tela fina para remover os sólidos perfurados enquanto recuperam aditivos e líquidos para o sistema ativo de circulação. Na Figura 2.2 é apresentado um *mud cleaner* da empresa *Marindco*.



Figura 2.2 – *Mud cleaner* pertencente à empresa *Marindco*

Os hidrociclos são dispositivos mecânicos simples, sem partes móveis, projetados para acelerar o processo de sedimentação. A energia hidráulica na alimentação é transformada em força centrífuga dentro do hidrociclo para acelerar a sedimentação das partículas. Os hidrociclos exercem um papel importante no sistema de separação de sólidos devido à capacidade de remoção eficiente de partículas menores do que as aberturas das telas finas de peneira. Apresentam a vantagem de serem equipamentos descomplicados, o que os torna simples de utilizar e manter.

O fluido de perfuração entra no hidrociclo utilizando a energia fornecida pela bomba centrífuga de alimentação. A velocidade do fluido faz com que as partículas girem rapidamente dentro da câmara do hidrociclo. Os sólidos mais pesados e o filme de líquido que os circunda tendem a se mover em uma espiral para fora e para baixo na direção da saída de sólidos (*underflow*). Os sólidos mais finos e mais leves juntamente com a fase líquida do fluido tendem a se mover em outra espiral para dentro e para cima em direção à descarga de líquidos (*overflow*) (Figura 2.3).

No campo de controle de sólidos, os hidrociclos recebem duas denominações: desareiadores e dessiltadores. O desareiador é um hidrociclo de diâmetro maior do que 5 polegadas (6, 8,

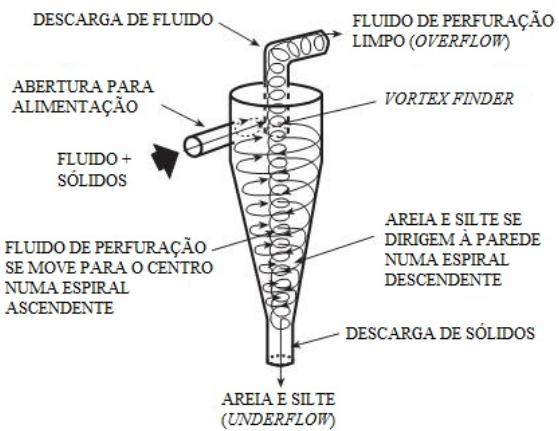


Figura 2.3 – Esquema de funcionamento de um hidrociclone. Adaptado de GN Solids Control (2010)

10 ou 12) instalados logo após às peneiras e remove as partículas na faixa de areia e os sólidos maiores que passaram pela peneira. O dessiltador é um hidrociclone menor do que o desareiador (4 ou 5 polegadas) e, consequentemente, remove partículas menores. Isso o torna um importante dispositivo de remoção de partículas do tamanho do silte³.

A capacidade de processamento do *mud cleaner* está limitada à capacidade da tela em descartar sólidos secos. Com a introdução das peneiras de vibração linear, a capacidade da tela do *mud cleaner* foi amplamente melhorada. Por sua vez, isso permite a utilização de hidrociclos adicionais levando a uma maior eficiência global.

O *overflow* dos hidrociclos é retornado para o sistema de circulação. Os sólidos e líquidos do *underflow* são direcionados para a tela fina. Os sólidos de perfuração retidos pela tela são encaminhados para o descarte, enquanto que o material que passa pela tela, incluindo a maioria da barita do fluido adensado, é direcionado ao próximo equipamento de separação.

2.2.1.3 Centrífuga decantadora

No sistema de controle de sólidos, após o *mud cleaner*, tem-se a centrífuga decantadora. Esse equipamento consiste de um parafuso transportador dentro de um tambor rotativo (Figura 2.4). Centrífugas decantadoras operam sob o princípio de submeter o fluido processado a altas rotações, acelerando a taxa de sedimentação dos sólidos.

O líquido livre e os sólidos mais finos são direcionados para a porção terminal da centrífuga e saem por transbordo por meio de comportas. Os sólidos maiores sedimentam contra a parede interna do tambor rotativo formando uma camada. Estes sólidos são empurrados para fora pelo parafuso transportador através de uma zona de drenagem ou praia. A secagem realmente acontece na praia, com os sólidos decantados sendo descarregados através de uma série de

³Chama-se silte a todo e qualquer fragmento de mineral ou rocha menor do que areia fina e maior do que argila, de amplo uso em geologia, corresponde a diâmetro maior que 4 μm e menor que 64 μm .

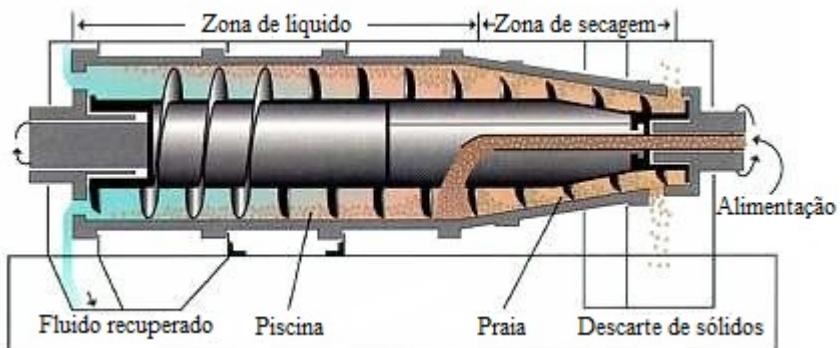


Figura 2.4 – Esquema de uma centrífuga decantadora. Adaptado de Sweco (2013)

furos. Uma caixa de engrenagens muda a velocidade relativa da rosca transportadora em relação ao tambor, proporcionando velocidades de rotação ligeiramente diferentes entre eles. Essa velocidade diferencial é necessária para transportar e descarregar os sólidos. O tambor e a rosca transportadora giram a velocidades entre 1500 e 4000 rpm, dependendo do diâmetro do tambor. Essa rotação desenvolve força centrífuga suficiente para sedimentar os sólidos ao longo da superfície interna da parede do tambor.

Os sólidos removidos pela centrífuga decantadora são encaminhados para o descarte de resíduos, enquanto que o fluido de perfuração limpo retorna ao sistema ativo.

2.2.2 Disposição de resíduos

A presente subseção discorre acerca de algumas técnicas utilizadas para disposição dos resíduos, tanto em ambiente *offshore* quanto *onshore*. É desejável que o sistema de controle de sólidos funcione de modo satisfatório para que seja mínima a geração de resíduos da perfuração.

Técnicas de disposição de resíduos *offshore*

A seguir são descritas duas técnicas de disposição dos resíduos gerados da perfuração: descarte direto e injeção.

O descarte direto é o modo mais comum de eliminação de sólidos gerados durante as operações de perfuração *offshore*, pois é mais simples e mais barato. Porém, essa atividade possui riscos ambientais, pois mesmo após passar pelo sistema de tratamento o cascalho gerado contém certa quantidade de produtos químicos incorporados em sua massa. Os fluidos de perfuração também podem ser descartados diretamente, desde que a perfuração seja realizada com fluidos à base de água, pois o impacto ambiental relativo a esses fluidos é baixo quando descartados no ambiente marinho. O uso de fluidos à base de óleo ou à base sintética reduz a quantidade total de resíduos de perfuração gerados, contudo é sabido que são mais impactantes quando descartados no ambiente marinho (SOUZA, 2012).

A injeção é uma técnica de disposição de resíduos onde o cascalho e outros resíduos da perfuração são misturados formando uma lama. Esta lama resultante é então injetada em uma

formação rochosa abaixo de aquíferos. A principal desvantagem dessa técnica é a possibilidade de contaminação da água potável em caso de vazamento do resíduo para o aquífero. Essa opção de disposição é limitada para locais em que as formações rochosas não são sensíveis a vazamentos (ONWUKWE; NWAKAUDU, 2012).

Se no ambiente marinho o descarte direto não é permitido e a injeção não é possível, então os resíduos de perfuração devem ser recolhidos e transportados para terra para o tratamento ou descarte final *onshore*.

Técnicas de disposição dos resíduos *onshore*

Para a disposição de resíduos de fluido *onshore*, uma possível técnica é a disposição no solo, conhecida como *land farming*. Esta técnica consiste em espalhar os resíduos em uma área designada de terra. O objetivo da aplicação de resíduos de perfuração na terra é permitir que a população microbiana natural do solo metabolize e transforme os constituintes dos resíduos do local. Esta técnica pode ser utilizada com segurança como um meio de imobilização e biodegradação de muitos resíduos nos campos petrolíferos. A capacidade de carga do solo deve ser conhecida e não deve ser ultrapassada, a fim de manter a condição aeróbia no local (ONWUKWE; NWAKAUDU, 2012).

O aterro é o método *onshore* mais comumente utilizado para dispor dos resíduos da perfuração. É uma técnica na qual o cascalho é misturado com determinados resíduos para conseguir propriedades físicas e químicas na mistura resultante, adequadas para o aterro. A mistura é então colocada em uma célula para aterro, onde a parte superior da célula deve estar abaixo da zona comum de enraizamento da vegetação e a parte inferior da célula permanece, no mínimo, 5 metros acima de lençóis freáticos. Deve ser feito de forma responsável, levando em consideração a quantidade de metais pesados e sais contidos nos resíduos (SOUZA, 2012).

2.3 Peneiramento Vibratório

Esta seção trata em detalhes da primeira linha de defesa para a manutenção apropriada do fluido de perfuração: a peneira vibratória. Ela tem a função de separar os sólidos de perfuração mais grosseiros do fluido de perfuração de tamanho maior que 74 μm (ASME, 2005). Sem um peneiramento adequado do fluido de perfuração, a eficiência de todo o sistema de separação da sonda fica seriamente comprometida.

As peneiras, sob vários aspectos, têm tido um papel proeminente nos sistemas de separação de sólidos há várias décadas. Elas evoluíram de equipamentos pequenos e simplórios, capazes de processar apenas sólidos mais grosseiros, aos modelos encontrados na atualidade. As peneiras modernas, de alto desempenho, são capazes de operar com telas tão finas quanto 200 *mesh*⁴ na maioria das aplicações no campo.

⁴*Mesh* é definido como o número de aberturas por polegada linear, medida ao longo de um fio (série *Tyler*).

A maioria das peneiras vibratórias usa um tanque de distribuição para a recepção do fluido vindo da perfuração (Figura 2.5). O fluido de perfuração passa pelo vertedouro para que seja distribuído uniformemente na tela de peneiramento, sendo esta montada em uma cesta que vibra para auxiliar no transporte de sólidos e na passagem de fluido pelas aberturas da tela. O elemento responsável por fornecer vibração à cesta é chamado de motovibrador, que consiste em um motor equipado com corpos excêntricos rotatórios acoplados ao seu eixo. A cesta fica sobre membros que isolam o movimento de vibração de outras partes da peneira. Estes membros de isolamento são apoiados por um suporte fixo. Abaixo da cesta, uma base é usada para coletar o fluido passante e as partículas que passaram pelas aberturas da tela. Os sólidos grosseiros e o fluido agregado são descarregados ao final da peneira.

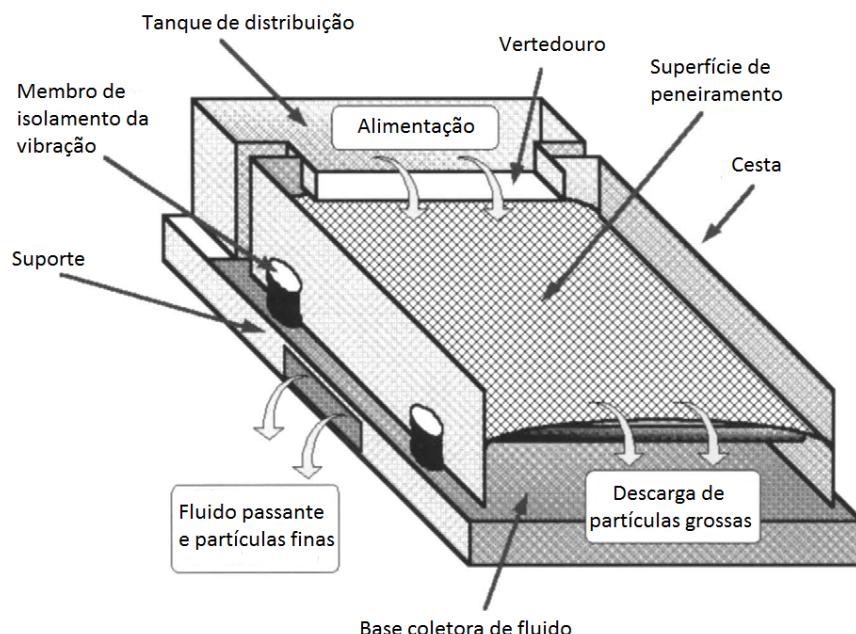


Figura 2.5 – Descrição típica de uma peneira vibratória. Adaptado de: *American Association of Drilling Engineers - AADE (1999)*

Para melhorar o desempenho da operação, fabricantes produzem peneiras com diferentes configurações de cesta. A posição da tela pode ser horizontal (Figura 2.6C e D) ou ter inclinação ajustada a depender do modelo de peneira (Figura 2.6A, B, E e F). Também podem ter uma única tela (Figura 2.6A, C e E) ou mais de uma tela montada em sua cesta (Figuras 2.6B, D e F). Em unidades de múltiplas telas, o fluido passa pela superior antes de encontrar a inferior. Para que isso aconteça, bandejas são colocadas entre as telas, de forma a garantir que o material passante chegue apenas no início da próxima tela (AADE, 1999).

Outro fator de grande importância relacionado ao funcionamento das peneiras vibratórias é o tipo de movimento que estas irão produzir (com o auxílio de um ou mais motovibradores) quando estiverem em operação. Historicamente, a progressão dos projetos de peneiras vibratórias permitiu o uso de telas mais finas. Este processo evolutivo levou à quatro fases distintas de tecnologia e desempenho de peneiras. Tais fases podem ser definidas pelo tipo de movimento

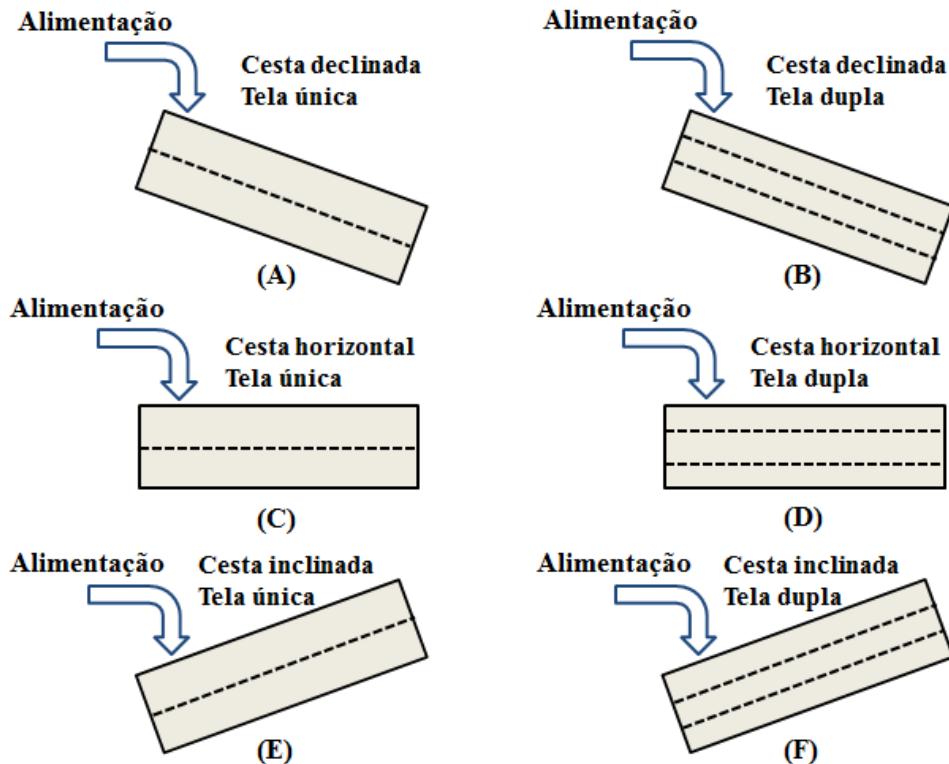


Figura 2.6 – Configurações para cestas de peneiras vibratórias. Adaptado de AADE (1999)

produzido pelas peneiras, sendo estes tipos dependentes da localização, orientação e número de motovibradores utilizados:

1. Elíptico desbalanceado
 2. Circular
 3. Linear
 4. Elíptico balanceado

Na década de 30, as peneiras vibratórias de movimento elíptico desbalanceado foram adaptadas da mineração para o campo de petróleo. Tal movimento é proporcionado por um motovibrador acima de seu centro de massa (Figura 2.7A). São de grande confiança mecânica, porém se limitam a operar com telas de 30 a 40 *mesh*. A orientação dos maiores eixos das elipses formados na região de alimentação e descarte têm maior impacto no transporte de material peneirado. É desejado que esta movimentação impulsione o material retido para a região de descarga da peneira. Entretanto, a elipse formada nesta região impulsiona o material no sentido oposto, dificultando a movimentação de sólidos na peneira até o descarte (AADE, 1999).

O movimento circular foi apresentado na década de 60. Tais peneiras possuem um motor-vibrador localizado no centro de massa do cesto (Figura 2.7B). Esta característica melhora o transporte de material para o descarte, corrigindo a dificuldade apresentada pelo movimento elíptico desbalanceado. Essa movimentação faz com que as perdas de fluido agregado aos sólidos sejam reduzidas sem sacrificar o transporte do material sobre a tela de peneiramento. A partir

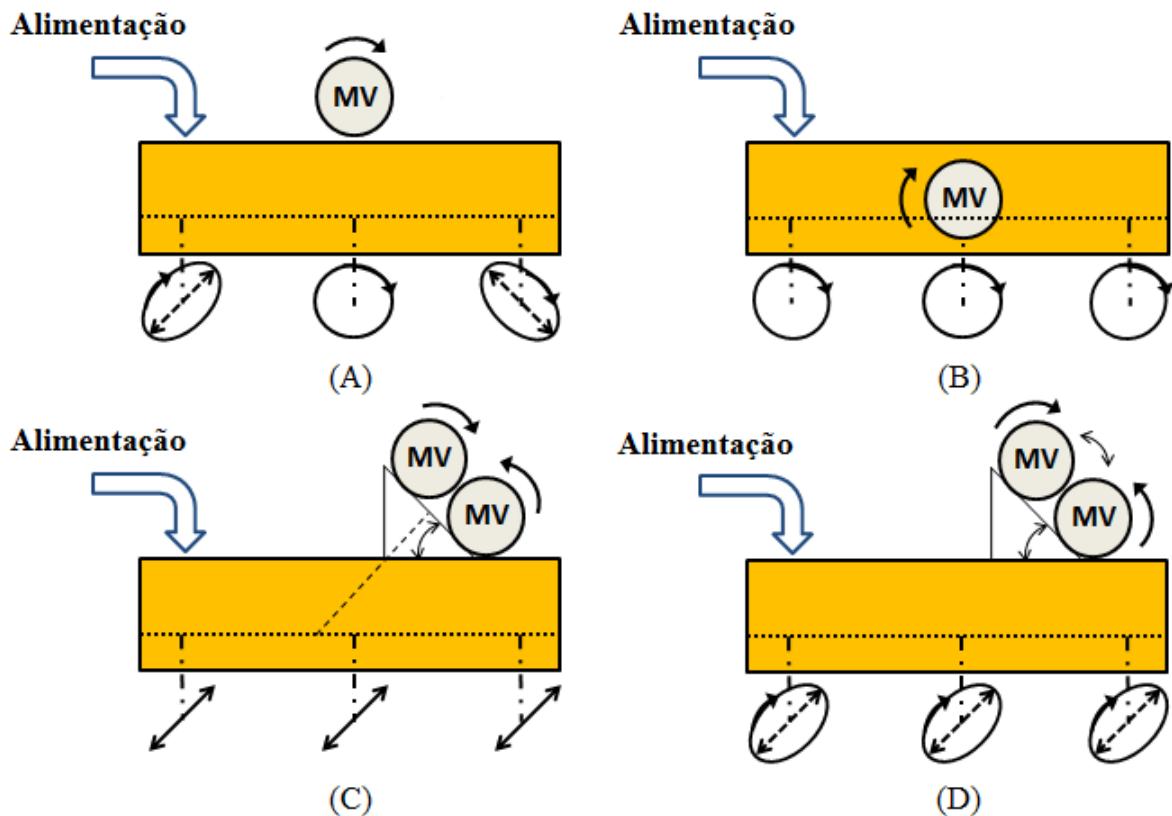


Figura 2.7 – Tipos de movimentos vibratórios: (A) Elíptico Desbalanceado; (B) Circular; (C) Linear e (D) Elíptico Balanceado

do movimento circular, as peneiras passaram a incorporar múltiplas telas. Telas para partículas grossas são montadas no topo do cesto e descarregam as partículas maiores, reduzindo assim a carga nas telas inferiores. Essas unidades permitiram o uso de telas de 80 a 100 *mesh*.

A introdução do movimento linear aconteceu no começo dos anos 80, proporcionando o uso de telas de 200 *mesh*. Tal movimento é produzido por um par de motovibradores em paralelo girando em sentido contrário (Figura 2.7C), permitindo o peneiramento com a cesta inclinada de forma ascendente, aumentando o tempo de residência do material sobre a tela. A movimentação em linha reta proporciona maior transporte de cascalho e maior vazão processada em telas mais finas. Para que haja o equilíbrio entre a passagem de fluido pelas aberturas da tela e o transporte de cascalho, os motovibradores devem ser montados formando um ângulo de 45° com a tela. Apesar do melhor desempenho, a vibração imposta por esse movimento é mais agressiva, reduzindo a vida útil das telas, além de aumentar a incidência de enceramento⁵ das mesmas.

O movimento elíptico balanceado, introduzido no início da década de 90, também permite o uso de telas de 200 *mesh*. Nesse movimento, todos os eixos elípticos estão inclinados para a região de descarte da peneira. É produzido por um par de motovibradores, paralelos ou distanciados com determinada angulação, girando em sentidos opostos (Figura 2.7D). A manipulação desse ângulo entre os motovibradores permite o ajuste do transporte de sólidos peneirados. Esse

⁵O enceramento da tela é causado por partículas pegajosas que cobrem as aberturas da tela.

movimento provê grande desempenho, assim como o linear e apresenta uma notória vantagem: menor incidência de enceramento de telas finas, já que sua movimentação é menos agressiva aliada a uma vibração menos intensa. Porém a capacidade de processamento do equipamento fica um pouco prejudicada frente às peneiras de movimento linear.

Com o objetivo de um melhor aproveitamento dos movimentos linear e elíptico balanceado, foi desenvolvido um modelo de peneira que pode operar com ambos os movimentos. A inserção de um motovibrador adicional proporciona uma componente de vibração a mais, perpendicular ao eixo de vibração do movimento linear. O operador pode escolher de acordo com as condições operacionais qual o movimento a ser utilizado, apenas acionando ou não o terceiro motor, resultando em grande flexibilidade operacional.

2.3.1 Avaliação de desempenho do peneiramento vibratório

Esta seção descreve os principais métodos para análise de desempenho da operação de peneiramento advindos da literatura.

2.3.1.1 Capacidade

A capacidade de uma peneira é a vazão máxima de fluido na qual o equipamento consegue processar a partir do momento em que o fluido em excesso (ou a fase líquida do fluido de perfuração) começa a ser descarregado ao final da peneira. A capacidade é determinada pela combinação de dois limites (AADE, 1999):

- O limite de fluido é a máxima vazão de fluido que pode ser processada pela peneira;
- O limite de sólidos é a quantidade máxima de sólidos que pode ser transportada até o final da peneira.

Esses dois limites estão inter-relacionados de tal forma que a quantidade de fluido a ser processada diminui à medida que a carga de sólidos aumenta.

A maioria das publicações referentes ao controle de sólidos na operação de peneiramento contempla a medição da capacidade para análise de desempenho. Porém no presente trabalho a capacidade não será medida devido à limitações da unidade experimental.

2.3.1.2 Vida útil da tela

A vida útil de uma tela é o tempo em que a mesma consegue operar sem que operação de peneiramento fique comprometida. A vida útil das telas varia muito de acordo com o desenho da tela, características operacionais e características do material a ser peneirado. A vida útil da tela pode ser maximizada se adotadas as práticas:

- Manter a tela limpa;
- Manter a tensão apropriada da tela;
- Não sobrecarregar a tela;
- Não operar a peneira sem fluxo sobre ela;

2.3.1.3 Teor de fluido no material de descarga

O controle do teor de fluido da descarga é relevante, pois indica o grau de recuperação de fluido de perfuração agregado ao cascalho que será descartado. É importante que haja a minimização desta variável para que o descarte de cascalho não comprometa o meio ambiente, além da economia na reposição deste fluido.

2.3.1.4 Eficiência Granulométrica Global

Seja F a vazão mássica da alimentação, D a de material retido na tela da peneira e U a vazão que passa pelas aberturas da tela; x_F , x_D e x_U as frações mássicas do material sólido nas três correntes, respectivamente. Considerando a operação ocorra sem acúmulo de massa na peneira, o material sólido alimentado deve sair nas duas correntes, D e U , o balanço global e o balanço para sólidos podem ser descritos pelas Equações 2.1 e 2.2, respectivamente.

$$F = D + U \quad (2.1)$$

$$Fx_F = Dx_D + Ux_U \quad (2.2)$$

A eficiência da operação de peneiramento é a medida da eficácia da separação entre o material sólido e o líquido. Para que se proceda com o cálculo da eficiência, divide-se a Equação 2.2 por Fx_F :

$$1 = \frac{Dx_D}{Fx_F} + \frac{Ux_U}{Fx_F} \quad (2.3)$$

A razão $(Dx_D)/(Fx_F)$ avalia a quantidade de material sólido retido que é coletada após o peneiramento em relação à quantidade alimentada, conforme apresentada na Equação 2.4.

$$E_D = \frac{Dx_D}{Fx_F} \quad (2.4)$$

De maneira análoga, define-se a razão de coleta de sólidos passantes:

$$E_U = \frac{Ux_U}{Fx_F} \quad (2.5)$$

Assim, $E_D + E_U = 1$.

Além de se conhecer a quantidade de sólidos que a peneira vibratória removerá ao separá-los da fase líquida, é importante conhecer também a distribuição de partículas das três correntes envolvidas. Tal informação tem por objetivo avaliar se a operação não está rejeitando material fino – importante para o controle de algumas propriedades do fluido de perfuração – e se não está permitindo a passagem de partículas grosseiras (pela tela da peneira) que possa interferir no desempenho dos equipamentos de separação subsequentes. Sendo assim, a análise granulométrica das correntes envolvidas no processo se torna fundamental para a medida da eficiência granulométrica da operação. 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).

Para a avaliação da eficiência de separação, faz-se necessária a introdução de um conceito bastante utilizado no que se refere à separação sólido-sólido ou sólido-líquido: o ponto de corte. Tal termo é usado tanto para descrever pontos específicos da curva de ponto de corte quanto para descrever a curva em si (MORGENTHALER; ROBINSON, 2007). O ponto de corte é uma ferramenta importante para que se tenha noção da eficiência de separação para cada tamanho de partícula após o peneiramento. Tendo conhecimento das distribuições granulométricas das correntes envolvidas no processo, realiza-se um balanço material de sólidos, porém em relação a cada faixa ou tamanho de partícula. Na Equação 2.6 tal balanço é apresentado.

$$F_{xF} \frac{dY_F}{dd_p} = D_{xD} \frac{dY_D}{dd_p} + U_{xU} \frac{dY_U}{dd_p} \quad (2.6)$$

Onde $\frac{dY_F}{dd_p}$, $\frac{dY_D}{dd_p}$ e $\frac{dY_U}{dd_p}$ são as frequências em massa das distribuições granulométricas da alimentação, do material retido e do passante, respectivamente.

Dividindo a Equação 2.6 por $F_{xF} \frac{dY_F}{dd_p}$ e substituindo $(D_{xD})/(F_{xF})$ por E_D (Equação 2.4), pode-se definir a curva de ponto de corte (ou de eficiência individual de separação) por tamanho para o material retido, conforme Equação 2.7.

$$G_D(d_p) = E_D \frac{\left(\frac{dY_D}{dd_p} \right)}{\left(\frac{dY_F}{dd_p} \right)} \quad (2.7)$$

A partir da Equação 2.7, é possível “plotar” a curva de ponto de corte. Nesse gráfico é apresentada a porcentagem de partículas de cada tamanho que ficará retida na peneira (LARSON, 2007). Na Figura 2.8 são apresentados o ponto de corte para peneiramento com tela de 75 µm de abertura e a curva de separação para um peneiramento ideal, representada pela linha contínua.

A partir da curva de ponto de corte, é possível determinar o diâmetro de corte (d_{50}) afim de se obter uma referência ao poder de classificação da peneira vibratória. O diâmetro de corte representa o tamanho de partícula relacionado à eficiência granulométrica de 50%, que é um tamanho onde 50% das partículas maiores que o diâmetro de corte terão probabilidade de serem coletadas com eficiência acima de 50% enquanto que as menores provavelmente serão coletadas com uma eficiência abaixo desse patamar (SILVA, 2012).

Em um peneiramento sólido-líquido ideal, apenas as partículas menores que as aberturas da tela estão presentes na corrente de passante, e apenas as partículas maiores que as aberturas ficam retidas, resultando em uma eficiência granulométrica de 100%. Porém em um peneiramento real, as partículas finas podem não ser peneiradas e as partículas grossas podem passar pela tela. No caso de retenção de finos, tal efeito pode ser explicado pela aderência das partículas pequenas às partículas grandes, aglomeração dos finos ou irregularidade das malhas. A passagem de grossos

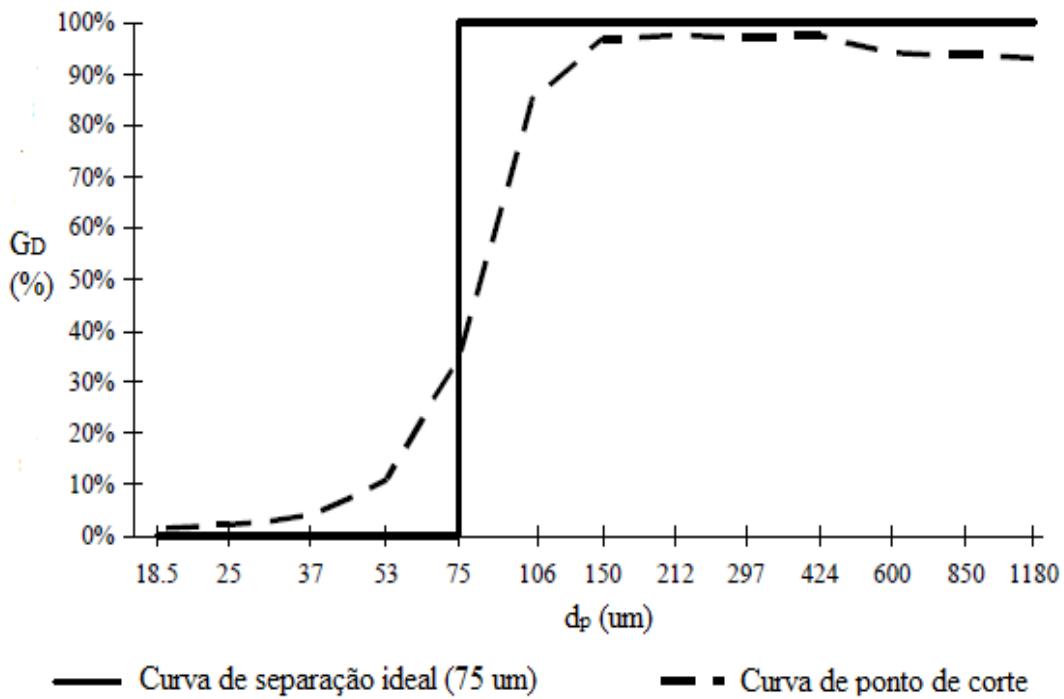


Figura 2.8 – Curva de ponto de corte da operação e curva de separação ideal. Adaptado de Larson (2007)

deve-se também à irregularidade das malhas, à vazamentos entre a tela e a cesta da peneira, ao formato das partículas ou à carga excessiva na peneira, podendo forçar essas partículas a passar pelas aberturas (MOREIRA, 2003).

Para se avaliar a eficiência granulométrica global de peneiramento, Schulz (1970) apud. Larson (2007) descreve um método para seu cálculo. Primeiramente é necessário conhecer a distribuição granulométrica da alimentação com o intuito de conhecer a massa de sólidos com partículas maiores e menores que a abertura da tela. Após o peneiramento, necessita-se saber a quantidade de sólidos em ambas as correntes de saída, bem como suas distribuições granulométricas. A eficiência para a corrente de material passante pode ser calculada como a razão entre a massa de partículas menores que a abertura da tela nessa corrente e a massa de partículas nessa mesma faixa de tamanho da alimentação (Equação 2.8).

$$\eta_U = \frac{Y_U(d_p \rightarrow \phi)}{Y_F(d_p \rightarrow \phi)} E_U \quad (2.8)$$

Sendo ϕ o tamanho da abertura da tela em questão.

De maneira análoga, a eficiência granulométrica para a corrente de retidos é dada pela razão entre a massa de partículas maiores que a abertura da tela nessa corrente e a massa de partículas nessa mesma faixa de tamanho da alimentação (Equação 2.9)

$$\eta_D = \frac{1 - Y_D(d_p \rightarrow \phi)}{1 - Y_F(d_p \rightarrow \phi)} E_D \quad (2.9)$$

As Equações 2.8 e 2.9 são importantes para que se conheça a quantidade de material fino na corrente de retido e de material grosso na corrente de passante.

Finalmente, para calcular a eficiência granulométrica global da operação, é necessário somar os numeradores das Equações 2.8 e 2.9, pois estes representam a quantidade de sólidos que foi separada de forma correta durante o peneiramento.

$$\eta(\%) = 100 \cdot \{E_U Y_U(d_p \rightarrow \phi) + E_D [1 - Y_D(d_p \rightarrow \phi)]\} \quad (2.10)$$

É possível concluir, de maneira trivial, que quanto mais η se aproxima de 100%, mais o formato da curva de ponto de corte se aproxima do formato da curva de separação ideal.

2.3.2 Variáveis operacionais que afetam o desempenho do peneiramento

O desempenho do peneiramento depende de fatores como:

- Características da tela (forma e tamanho de abertura, área aberta e condutância);
- Magnitude da vibração;
- Inclinação da cesta;
- Teor de sólidos da alimentação;
- Densidade e viscosidade do fluido a ser peneirado;
- Tamanho e formato das partículas.

A seguir será descrito cada um desses fatores, bem como seu efeito no desempenho da operação.

2.3.2.1 Tela de peneiramento

Para qualquer aplicação que envolva peneira vibratória, a escolha da tela a ser utilizada tem impacto significativo na remoção de sólidos. Por essa razão, o desempenho da operação é fortemente influenciado pela tela. A escolha da tela de peneiramento deve levar em conta a sua capacidade, o tempo de vida útil da tela, a resistência ao enceramento e à obstrução⁶ de material nas aberturas da tela e a remoção de sólidos promovida (FERREIRA, 2010).

O material usado na fabricação das telas é bastante variado: elas são feitas de fios metálicos, fios plásticos, placas perfuradas de plástico ou metal, etc. A escolha da tela de peneiramento deve sempre levar em conta o material a ser peneirado e o tamanho de partícula a ser separado.

Algumas características referentes à tela de peneiramento devem ser levadas em consideração na hora de sua escolha:

- Forma de abertura;
- Tamanho da abertura;

⁶A obstrução acontece quando as aberturas da tela são bloqueadas por partículas de tamanho aproximado das aberturas.

- Porcentagem de área aberta;
- Condutância.

A forma de abertura de uma tela é determinada pela maneira em que a mesma é construída. Telas com o mesmo número de fios na horizontal e vertical por polegada linear produzem aberturas quadradas denominadas telas de *mesh* quadrado. Telas com diferente número de fios na horizontal e vertical produzem aberturas retangulares são referenciadas como telas de *mesh* retangular ou oblongo (Figura 2.9).

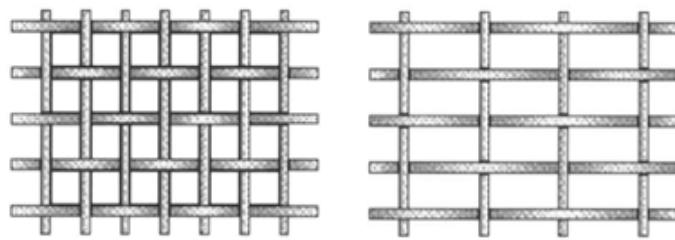


Figura 2.9 – Formas de abertura quadrada e retangular. Fonte: AADE (1999)

Quando se faz referência a uma tela de *mesh* quadrado, usa-se apenas um número para sua identificação, como por exemplo uma tela de 80 *mesh* (80#). Já para as telas de abertura retangular, as duas dimensões são utilizadas na identificação – tela de 60 *mesh* x 20 *mesh* (60 x 20#). Uma tela retangular permite a passagem de mais partículas de tamanhos e formas diferentes quando comparada a uma tela similar de *mesh* quadrado.

As telas podem ser construídas com uma ou mais camadas (Figura 2.10), possuindo aberturas regulares em tamanho e forma. Telas em camadas possuem dois ou mais tecidos de telas de fino *mesh* reforçados com um tecido mais grosso montados em um painel.

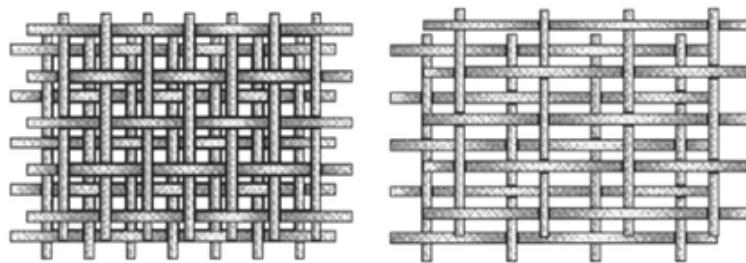


Figura 2.10 – Telas de peneiramento em camadas. Fonte: AADE (1999)

Atualmente, as telas finas podem ser reforçadas por um ou mais tecidos de suporte. Este reforço protege a tela fina de ser danificada e provê suporte adicional para cargas pesadas de sólidos, aumentando a vida útil das mesmas.

A real capacidade de separação de uma tela é amplamente determinado pelo tamanho de suas aberturas, que é a distância entre os fios do tecido da tela e é expresso em polegadas ou em μm , sendo o último mais comum. Na Equação 2.11 é apresentada uma forma de calcular

a abertura ϕ , em microns, em função do número de *mesh #M* e do diâmetro do fio da tela d_w expresso em polegadas.

$$\phi = 25400 \left(\frac{1}{\#M} - d_w \right) \quad (2.11)$$

Vale ressaltar aqui que apenas a especificação do número de *mesh* não especifica a abertura da tela, pois é preciso estar ciente do diâmetro do fio utilizado. Fios de diâmetros reduzidos resultam em maiores aberturas para a passagem de partículas de maior tamanho, mas apresentam capacidade e vida útil reduzidas frente à telas de fios maiores.

Outra característica importante levada em consideração na escolha de uma tela para o peneiramento é a porcentagem de área aberta, que é definida como a relação entre a área da superfície da tela que não está bloqueada pelos fios e a área total, que considera o espaço ocupado pelos fios. Tal definição é representada pela Equação 2.12.

$$\psi(\%) = 100 \frac{\phi_r \phi_s}{(\phi_r + d_{wr})(\phi_s + d_{ws})} \quad (2.12)$$

Sendo ϕ_r o comprimento da abertura na direção r , ϕ_s o comprimento da abertura na direção perpendicular à anterior, d_{wr} o diâmetro do fio perpendicular à direção r e d_{ws} o diâmetro do fio perpendicular à direção s .

Quanto maior a porcentagem de área aberta de uma tela, maior a sua capacidade teórica de processamento. A área aberta pode ser aumentada para um dado *mesh* ao se utilizar um diâmetro menor de fio, mas a vida útil da tela será sacrificada. Consequentemente, a escolha de uma tela em particular envolve um compromisso entre capacidade de processamento e vida útil.

Para avaliar a passagem de líquido pelas aberturas da tela, a condutância (ou permeabilidade equivalente da tela) é um parâmetro mais adequado para tal avaliação. A condutância é definida como a medida da facilidade de escoamento do fluido pelas aberturas da tela. É análoga à permeabilidade por unidade de espessura da tela, $k(darcy)/l(mm)$. A condutância pode ser calculada pela Equação 2.13.

$$C = \frac{\mu Q}{A_d \Delta P} \quad (2.13)$$

Onde μ é a viscosidade do fluido, Q é a vazão volumétrica de fluido que consegue ser processada, A_d é a área disponível para peneiramento e ΔP é a queda pressão referente à passagem de fluido pelas aberturas da tela. Maiores condutâncias indicam que a uma dada queda de pressão na tela, mais fluido será capaz de passar por ela, aumentando assim sua capacidade.

Fowler e Lim (1959) realizaram experimentos apenas com sólidos e constataram que a eficiência granulométrica é consideravelmente maior com o emprego de telas de maiores tamanhos de abertura de tela. Raja (2012) em seus testes com fluido de perfuração em escala industrial, verificou que a capacidade da peneira é maior com o uso de telas de maior abertura. Dahl et al. (2006) fizeram uma avaliação teórica e experimental do efeito da tela sobre uma operação de peneiramento e concluíram que o uso correto das telas faz com que a eficiência de separação e a vida útil das telas sejam otimizados.

2.3.2.2 Vibração

Peneiras são vibradas para impulsionar as partículas de modo a transportá-las até a descarga e também faz com que as partículas menores e o líquido agregado passem pelas aberturas da tela. Porém, a vibração excessiva pode fazer com que o sólido seja transportado de forma brusca, prejudicando a separação, e também faz com que a vida útil da tela seja reduzida. Altas vibrações são utilizadas para altas vazões de alimentação (WILLS; NAPIER-MUNN, 2006).

Um parâmetro importante para a medição dessa vibração é a amplitude (A), calculada pela Equação 2.14.

$$A = \frac{we}{W} \quad (2.14)$$

Onde w é a massa do corpo excêntrico, e é a excentricidade⁷ e W é a massa da cesta da peneira.

Aplicando a segunda Lei de Newton, é possível calcular a força de pico (ou força máxima) aplicada pela vibração à peneira:

$$F_P = W a_P \quad (2.15)$$

Sendo a_P a aceleração vibracional de pico.

O deslocamento vertical da cesta sob vibração u é calculado pela Equação 2.16.

$$u = A \operatorname{sen}(2\pi f t) \quad (2.16)$$

Sendo f a frequência vibracional, que é outro parâmetro importante de vibração, e t o tempo.

A velocidade é a primeira derivada do deslocamento e a aceleração a segunda derivada $\frac{d^2 u}{dt^2}$. Derivando a Equação 2.16 duas vezes, obtém-se a aceleração.

$$a = (2\pi f)^2 A \operatorname{sen}(2\pi f t) \quad (2.17)$$

O valor de pico de aceleração ocorre quando a função seno assume o seu máximo valor em módulo, que é um. Substituindo as Equações 2.14 e 2.17 como aceleração de pico na Equação 2.15, obtém-se a nova equação da força de pico.

$$F_P = we(2\pi f)^2 \quad (2.18)$$

Analizando a Equação 2.18, verifica-se que a força vibracional depende das características do corpo excêntrico e da frequência de vibração. Logo, conclui-se que a adição de massa ao sistema não alterará a força imposta ao equipamento em vibração. Por outro lado, ao analisar a Equação 2.14, constata-se que a amplitude diminuirá à medida que a massa de cesta aumenta pela adição de fluido à peneira.

Uma forma bastante usual de medir vibração, que é encontrada na literatura, é através da força-g, que é definida como a razão entre a aceleração vibracional e a aceleração gravitacional

⁷A excentricidade referente à vibração é a distância do eixo do motovibrador ao centro de gravidade do corpo excêntrico (PRECISION MICRODRIVES, 2014).

da Terra. A Equação 2.19 apresenta o cálculo da força-g (Γ) a partir da Equação 2.17.

$$\Gamma = \frac{A(2\pi f)^2}{g} \quad (2.19)$$

Observa-se pela Equação 2.19 que a força-g é dependente da amplitude e da frequência de vibração. À medida que o fluido é alimentado à peneira, a força-g diminuirá pois a amplitude de vibração diminui, porém a força vibracional imposta ao sistema continuará constante já que a frequência continua constante. Esse é um problema se o operador pretende trabalhar com uma intensidade de vibração constante durante toda a operação.

Dorry (2010) trabalhou com um sistema equipado com um controlador PID que media o sinal de força-g e manipulava a frequência de vibração com o objetivo de manter a força-g a um nível constante. Assim, ele realizou experimentos para verificar a influência da vibração na capacidade da peneira e observou que o aumento da força-g resulta no aumento do transporte de material retido e um forte aumento da capacidade até certo ponto, e a partir daí o aumento se torna mais suave, tanto com peneira com movimentação linear quanto com elíptica balanceada. O mesmo autor também realizou análise do teor de sólidos do material descartado e verificou que não há variação significativa com o aumento da força-g. Já Raja (2012) realizou testes sem controle de força-g e observou também que a capacidade aumenta com o aumento da vibração em todos os seus experimentos.

Scott (2006) desenvolveu um sistema automático de controle para peneiramento vibratório que ativa por um curto tempo um modo de aumento da força-g quando há um aumento da vazão de alimentação e verificou que essa tecnologia é eficaz para o processamento de fluido frente a flutuações na alimentação.

2.3.2.3 Inclinação da cesta

A capacidade das peneira é definida a partir da relação custo-benefício entre o transporte de sólidos e a passagem de fluido pelas aberturas da tela quando se trata da inclinação da cesta. Uma inclinação descendente melhora o transporte de sólidos, porém a descarga terá mais fluido agregado. Por outro lado, uma inclinação ascendente aumenta a capacidade de processamento do fluido pelas aberturas da tela por aumentar o tempo de residência, mas aumenta a incidência de obstrução da tela e também diminui sua vida útil (HOBEROCK, 1981) apud. (RAJA, 2012).

Scott (2006) em seu trabalho com o controle automático de peneiramento vibratório media o nível de fluido sobre a tela e o comparava com um *set-point*. Se estivesse acima do valor, o sistema aumentava a inclinação para conseguir processar mais fluido. Se estivesse abaixo do *set-point*, o sistema diminuía a inclinação para melhorar o transporte de sólidos. Seu controle com variação do ângulo da cesta e modo de aumento da força-g maximizou o processamento de fluido e a vida útil das telas utilizadas.

Em seus experimentos, Raja (2012) utilizou inclinações descendente, horizontal e ascendente da cesta e constatou que a maior capacidade foi alcançada na inclinação ascendente e a menor na inclinação descendente.

2.3.2.4 Teor de sólidos na alimentação

Os sólidos competem com o fluido por aberturas na tela da peneira. Assim, teoricamente, quanto maior o teor de sólidos, maior é a competição, causando um efeito negativo na capacidade e na eficiência da peneira (WILLS; NAPIER-MUNN, 2006).

Nos testes de variação no teor de sólidos conduzidos por Raja (2012), foi verificada uma diminuição na capacidade da peneira com o aumento do teor de sólidos, mas até certo valor. A partir deste valor, a capacidade se tornou aparentemente insensível à concentração. Fowler e Lim (1959) constataram que o aumento da vazão de alimentação implicou em uma diminuição no valor da eficiência granulométrica de separação de sólidos.

2.3.2.5 Densidade e viscosidade do fluido

A capacidade da peneira aumenta assim que a densidade do fluido aumenta devido ao aumento de pressão exercida sobre a tela da peneira que age como uma força motriz para a passagem de fluido pelas aberturas. Porém o aumento da densidade através da adição de agentes adensantes pode provocar a diminuição da capacidade de processamento pois haverá o aumento na quantidade de sólidos, o que dificulta a passagem de líquido pela tela da peneira (AADE, 1999).

Em relação à viscosidade do fluido, a capacidade de uma peneira vibratória diminui à medida que a viscosidade plástica aumenta. Raja (2012) estudou o efeito da viscosidade plástica de um fluido de perfuração sobre a capacidade de uma peneira industrial e concluiu que quanto maior a viscosidade, mais lento foi o transporte de material sobre a tela da peneira.

2.3.2.6 Tamanho e formato das partículas

Em uma distribuição granulométrica, as partículas de tamanho ligeiramente maior que a abertura da tela podem causar obstrução, diminuindo a área disponível para que o fluido e as partículas pequenas passem pela peneira. Um leve aumento na quantidade de partículas de tamanhos próximos à abertura da peneira resulta em diminuição da capacidade de peneiramento (AADE, 1999).

Trumic e Magdalovic (2011) conduziram experimentos com peneiramento em batelada variando a porcentagem de partículas de tamanho menores que 75% do tamanho da abertura da tela e constataram que quanto maior essa quantidade, mais rápido foi realizado o peneiramento.

O formato irregular das partículas geralmente torna o peneiramento mais difícil. Em seus experimentos com sólidos granulares, Trumic e Magdalovic (2011) constataram que quanto mais irregulares eram partículas, pior era a eficiência.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo apresenta informações sobre o planejamento de experimentos utilizado para a realização da parte experimental, a suspensão de rocha fosfática diluída em água a ser peneirada, as variáveis respostas obtidas nos experimentos e a unidade experimental utilizada, assim como a metodologia para a operação da unidade e o procedimento de coleta de dados para posterior discussão dos resultados.

3.1 Planejamento de experimentos

Quando existem diversas possibilidades de combinação das variáveis relevantes no processo, a análise dos experimentos é mais confiável utilizando-se técnicas estatísticas para este fim. O planejamento experimental é uma ferramenta poderosa para estudar o efeito conjunto de vários fatores sobre uma variável resposta de interesse. Uma das técnicas mais conhecidas é o planejamento fatorial, no qual estão envolvidos k fatores (ou variáveis) presente em diferentes níveis (BOX et al., 2005).

O planejamento fatorial é classificado como um método do tipo simultâneo, ou seja, as variáveis de interesse são analisadas ao mesmo tempo. Este fato confere ao planejamento grande vantagem em relação ao método univariado, onde o pesquisador altera uma variável mantendo as demais constantes. As principais vantagens são: melhor estimativa de efeitos e possibilidade de estimar efeitos de interação entre diferentes fatores (PEREIRA, 2013). Neste trabalho o planejamento fatorial 3^k foi utilizado.

No planejamento fatorial a três níveis, as variáveis independentes são codificados em: -1 , que representa o menor nível; 0 , representando o nível central e $+1$, que corresponde ao maior nível. A Tabela 3.1 apresenta o planejamento fatorial utilizado para a realização dos experimentos deste trabalho.

Tabela 3.1 – Matriz de planejamento fatorial a três níveis utilizada neste trabalho.

Experim.	x_1	x_2	x_3	Experim.	x_1	x_2	x_3	Experim.	x_1	x_2	x_3
1	-1	-1	-1	10	0	-1	-1	19	+1	-1	-1
2	-1	-1	0	11	0	-1	0	20	+1	-1	0
3	-1	-1	+1	12	0	-1	+1	21	+1	-1	+1
4	-1	0	-1	13	0	0	-1	22	+1	0	-1
5	-1	0	0	14	0	0	0	23	+1	0	0
6	-1	0	+1	15	0	0	+1	24	+1	0	+1
7	-1	+1	-1	16	0	+1	-1	25	+1	+1	-1
8	-1	+1	0	17	0	+1	0	26	+1	+1	0
9	-1	+1	+1	18	0	+1	+1	27	+1	+1	+1

Foram definidas como variáveis independentes: a tela da peneira (como variável codificada x_1), a concentração volumétrica de sólidos (C_V) na alimentação (como x_2) e a vibração ou força-g (Γ) promovida pela peneira (como x_3). A Tabela 3.2 traz a correspondência da cada variáveis com sua forma codificada.

Tabela 3.2 – Correspondência entre as variáveis e suas formas codificadas

Nível	Tela (<i>mesh</i>)	C_V (%)	Γ (adim.)
-1	125	1,0	1,00
0	150	2,0	2,25
+1	175	3,0	3,50

As telas utilizadas foram escolhidas com base no número de *mesh* daquelas empregadas em peneiras vibratórias em unidade de perfuração de poços (até 200 *mesh*). A Tabela 3.3 apresenta importantes informações acerca das características das telas utilizadas, como tamanho de abertura (ϕ) e porcentagem de área aberta (ψ), propriedades que foram descritas no subitem 2.3.2.1. Tais propriedades foram obtidas junto à Tegape, empresa fornecedora destas telas.

Tabela 3.3 – Características das telas utilizadas neste trabalho

Tela (#M)	ϕ (μm)	ψ (%)
125	130	36
150	106	38
175	95	42

Os valores de força-g empregados nesse trabalho se encontram abaixo dos utilizados por autores como Raja (2012) e Dorry (2010) devido à limitação da potência dos motovibradores empregados. O procedimento para o controle de força-g na unidade experimental será descrito posteriormente neste capítulo.

3.2 Material para peneiramento

A seleção de um material particulado que represente com fidelidade o cascalho de perfuração não é uma tarefa trivial, pois este material apresenta-se em faixas granulométricas que variam amplamente conforme a broca utilizada, o tipo de rocha e a profundidade do poço perfurado. Assim, no que se refere ao tamanho, o material sólido utilizado nos experimentos foi a rocha fosfática devido à sua faixa de tamanho. A Figura 3.1 apresenta a distribuição de tamanho de partícula da rocha fosfática medida por difração a laser pelo equipamento *Mastersizer 2000* da *Malvern*, e a dos sólidos de perfuração provenientes da central de cascalho da Petrobras, situada no município de Carmópolis/SE (material sólido utilizado por Pereira (2013) em testes com microondas) medida por um conjunto de peneiras da série *Mesh/Tyler*.

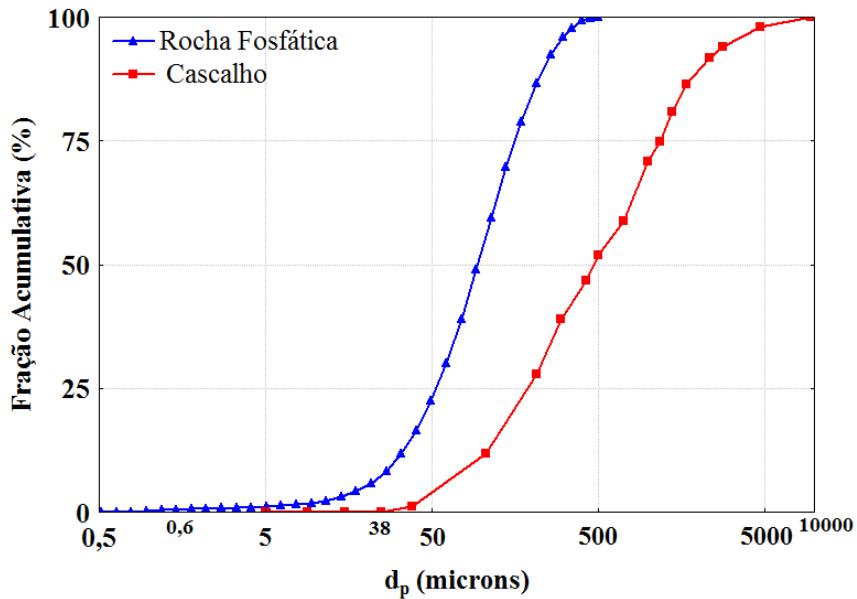


Figura 3.1 – Distribuição acumulada de tamanho de partícula da rocha fosfática utilizada e do cascalho utilizado por Pereira (2013)

A partir da Figura 3.1, nota-se que a rocha fosfática possui granulometria que varia de 0,6 a 500 μm , sendo que 50% das partículas possuem diâmetro menor que 94 μm , e a distribuição do cascalho utilizado por Pereira (2013) possui tamanho na faixa de 38 a 9520 μm , sendo que metade das partículas de cascalho tem diâmetro inferior a 500 μm , o que se conclui que a faixa de tamanho da rocha fosfática abrange metade da distribuição de tamanho deste cascalho. A tabela de dados da distribuição granulométrica da rocha fosfática e do cascalho se encontra no Apêndice A deste trabalho.

Para a realização dos experimentos, foi preparado um barril (159 litros) de uma suspensão com água, rocha fosfática e goma xantana. A quantidade de goma xantana usada foi 10 gramas, cujo objetivo foi o de aumentar a viscosidade da suspensão no tanque de alimentação. O reograma da suspensão foi obtido através do equipamento *R/S Plus Rheometer* da *Brookfield*. A viscosidade aparente média obtida para deformações acima de 400 s^{-1} é de 3,5 cP. Não foi possível aumentar mais a viscosidade com a adição de uma massa maior de goma xantana, porque se assim fosse a incidência de enceramento à tela seria bastante elevada, o que tornaria inviável a separação da suspensão em duas correntes.

Para a preparação da suspensão de acordo com as concentrações volumétricas definidas pelo planejamento de experimental, foi necessário calcular a quantidade de rocha fosfática, em massa (m_{RF}), correspondente ao C_V em questão de acordo com a Equação 3.1.

$$m_{RF} = 100\rho_{RF}C_VV_{susp} \quad (3.1)$$

Sendo ρ_{RF} a massa específica da rocha fosfática e V_{susp} o volume da suspensão a ser peneirada (em L) que foi definido recentemente.

A massa específica da rocha fosfática foi determinada por picnometria a gás hélio e vale $3,248 \text{ g/cm}^3$. O cálculo da massa de sólidos utilizada não contemplou a quantidade de goma xantana adicionada visto que 10 gramas é um valor bastante baixo e que assim não interfere nos cálculos.

Foi calculada também a massa específica da suspensão (ρ_{susp}) para cada valor de concentração volumétrica, através da Equação 3.2.

$$\rho_{susp} = \frac{m_{RF} + \rho_{H_2O} \left(V_{susp} - \frac{m_{RF}}{\rho_{RF}} \right)}{V_{susp}} \quad (3.2)$$

Onde ρ_{H_2O} é massa específica da água, que assume o valor de $0,9970 \text{ g/cm}^3$ à 25°C .

Assim, a Tabela 3.4 apresenta os valores de m_{RF} e ρ_{susp} correspondentes à cada concentração volumétrica.

Tabela 3.4 – Correspondência entre massa de rocha fosfática e densidade para cada concentração volumétrica

$C_V (\%)$	$m_{RF}(\text{kg})$	$\rho_{susp} (\text{g/cm}^3)$
1,0	5,16	1,0202
2,0	10,33	1,0427
3,0	15,49	1,0652

Os valores de massa específica são muito próximos, além de serem levemente superiores à da água, o que era esperado já que são concentrações volumétricas baixas. Já os valores de massa de rocha fosfática são relevantes devido à alta massa específica deste sólido. Calculando a fração mássica de sólidos a partir da razão entre massa de rocha fosfática e massa de suspensão, os valores obtidos são 3,26%; 6,51% e 9,77% para as concentrações de 1, 2 e 3% respectivamente, o que reforça a relevância da quantidade de rocha utilizada na suspensão.

Ao se analisar as propriedades físicas da suspensão e da rocha fosfática empregadas neste trabalho, estas não se aproximam das propriedades de um fluido de perfuração com cascalho advindos da operação de perfuração de poços de petróleo ou mesmo das de um simulante. Vale aqui ressaltar que este trabalho visa a melhor compreensão do efeito das variáveis de processo, apresentadas anteriormente, na operação de peneiramento vibratório, para que posteriormente este estudo possa ser estendido para uma unidade de controle de sólidos.

3.3 Respostas avaliadas nos experimentos

Neste trabalho serão avaliadas as seguintes respostas:

- Teor de umidade do material retido pela tela da peneira;
- Eficiência granulométrica global de separação;
- Diâmetro de corte para a coleta de partículas no material retido.

Para introdução das respostas, a Figura 3.2 é apresentada para melhor compreensão:

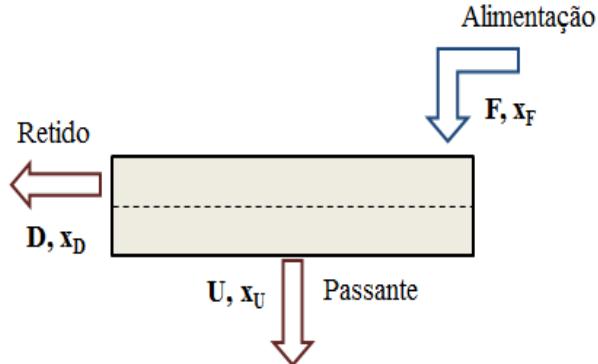


Figura 3.2 – Esquema para o balanço de massa realizado

O balanço de massa na peneira foram realizados através das Equações 2.1 e 2.2, sendo que F é a suspensão alimentada, D a corrente de material retido na tela da peneira e U a corrente que passa pelas aberturas da tela; x_F , x_D e x_U as frações mássicas do material sólido nas três correntes, respectivamente.

Para o cálculo do teor de umidade $H(%)$, amostras do material retido D eram recolhidas e levadas à estufa a 105 °C por 24 horas e pode ser representado pela Equação 3.3.

$$H(%) = 100(1 - x_D) \quad (3.3)$$

O cálculo da eficiência granulométrica global seguiu a metodologia descrita no item 2.3.1.4. Amostras de ambas as correntes de saída foram coletadas a fim de se determinar suas distribuições granulométricas. Neste trabalho, a análise de distribuição de partículas foi feita por difração a *laser*. Devido às dificuldades de amostragem da alimentação, a distribuição da mesma foi calculada a partir das saídas através de um balanço de massa por tamanho de partícula representado pela Equação 2.6. Por fim, o cálculo final dessa eficiência foi obtido através da Equação 2.10.

O diâmetro de corte (ou d_{50}) foi obtido também pela metodologia do item 2.3.1.4, porém a partir da Equação 2.7, atribuindo o valor de 0,5 para G_D . Neste trabalho, o d_{50} foi obtido por interpolação a partir da tabela de dados de distribuição granulométrica das correntes envolvidas.

3.3.1 Localização do ponto ótimo entre teor de umidade e eficiência granulométrica

A fim de se localizar o ponto ótimo dentro da região experimental, apresentando para isso, tanto um baixo teor de umidade quanto uma elevada eficiência de separação, realizou-se um estudo de otimização a partir do tratamento dos dados obtidos através do planejamento proposto pela Tabela 3.1. Para isso as superfícies de resposta obtidas foram avaliadas de forma iterativa

com auxílio do *software GAMS*, de modo à maximizar uma função objetivo, definida por G_{obj} , e que pode ser representada pela Equação 3.4.

$$G_{obj} = G_\eta G_H \quad (3.4)$$

Em que as funções G_η e G_H consistem na normalização das respostas de η e H obtidas a partir das equações de ajuste das respostas observadas. Essas funções podem ser expressas através das Equações 3.5 e 3.6, respectivamente.

$$G_\eta = \frac{\eta - \eta_{MIN}}{\eta_{MAX} - \eta_{MIN}} \quad (3.5)$$

$$G_H = \frac{H_{MAX} - H}{H_{MAX} - H_{MIN}} \quad (3.6)$$

Em que os subscritos *MIN* e *MAX* denominam os valores mínimo e máximo, tanto de η quanto de H obtidos pelas equações de ajuste. A escolha da função objetivo descrita pela Equação 3.4 foi criada de forma a balancear, de forma igualitária, os efeitos das respostas obtidas.

3.4 Unidade Experimental

A unidade experimental utilizada é apresentada na Figura 3.3. Esta é constituída de uma peneira vibratória com 1,65 m de comprimento, 0,81 m de largura e 1,0 m de altura, equipada com dois motovibradores e um quadro para montagem da tela, podendo esta última ser trocada quando necessário, um tanque de 500 litros com agitação para alimentação da suspensão à peneira, uma calha de aço inoxidável na entrada da peneira; um tanque de 200 litros para coleta do material passante, um balde de 50 litros para coleta do material retido, uma bomba centrífuga para bombar este líquido passante de volta ao tanque de alimentação e um computador para monitoramento e controle da vibração e tratamento de dados. Foi decidido por declinar a peneira de forma a proporcionar um melhor transporte de retidos, sendo esta declinação da peneira em relação ao piso calculada por trigonometria, resultando em 2,25 graus.

Tanto a peneira quanto os motovibradores foram fornecidos pela *Vibrokraft*. Os motovibradores são do modelo VR4-07 (Figura 3.4) e possuem 0,75 cv de potência. Esses foram posicionados para rotacionarem em sentidos opostos de forma a garantir a vibração adequada da peneira. Neste trabalho os motovibradores são responsáveis por impor movimento linear ao material disposto sobre a tela de peneiramento, e seus contra-pesos possuem a maior excentricidade permitida pelo fabricante para assim proporcionar maiores amplitudes de oscilação.

Para medir a vibração imposta, foi utilizado um acelerômetro piezelétrico da marca *PCB Piezoeletronic* modelo 646B00, mostrado na Figura 3.5, o qual foi responsável por enviar um sinal na faixa de 4 a 20 mAcc a um computador através da placa de aquisição de dados da *National Instruments* modelo USB 6008 (Figura 3.6). A grandeza do sinal é dada em força-g numa faixa de 0 a 10 g_{rms} .

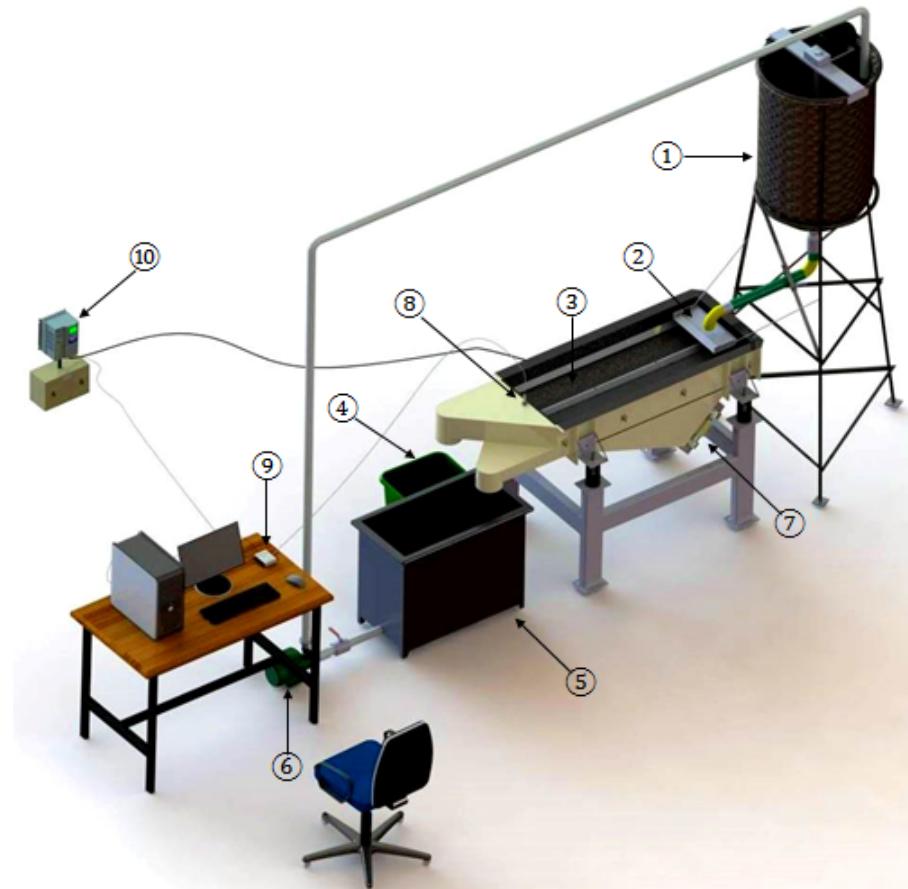


Figura 3.3 – Unidade para realização dos experimentos: ① - tanque de 500 L com agitador; ② - calha de alimentação; ③ - tela de peneiramento; ④ - balde para o material retido; ⑤ - tanque de descarga de 200 L; ⑥ - Bomba centrífuga; ⑦ - motovibradores; ⑧ - acelerômetro; ⑨ - placa de aquisição de dados e ⑩ - inversor de frequência



Figura 3.4 – Motovibradores usados para impor movimento vibracional à peneira

Para manipular a vibração imposta ao sistema, ajustou-se a frequência de rotação dos motovibradores por meio de um inversor de frequência da marca *WEG* modelo *CFW700*, conforme Figura 3.7.

O software utilizado para auxiliar a coleta de dados e monitoramento da unidade experimental foi o *Labview 2013* da *National Instruments*, conforme mostrado nas Figuras 3.8 e 3.9.



Figura 3.5 – Acelerômetro utilizado para aquisição de dados referente à vibração imposta à peneira



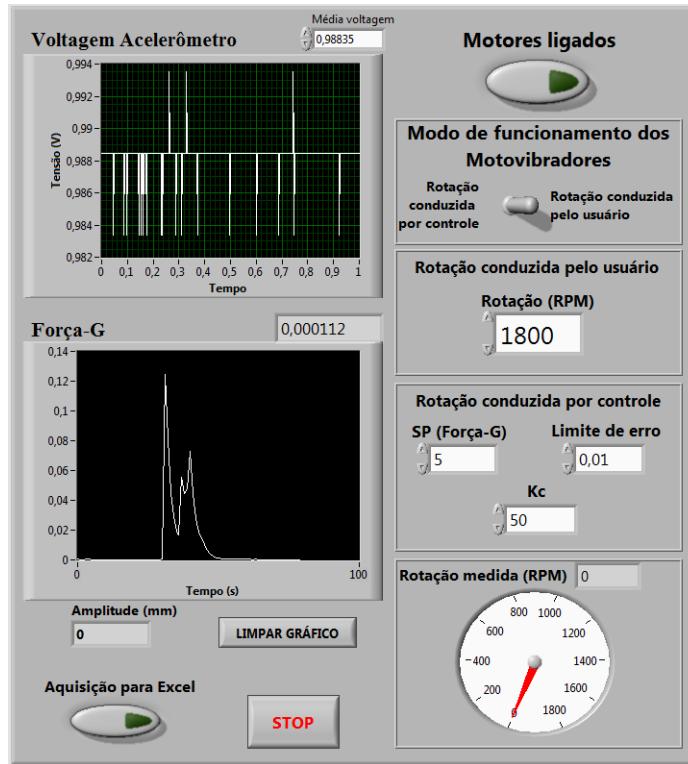
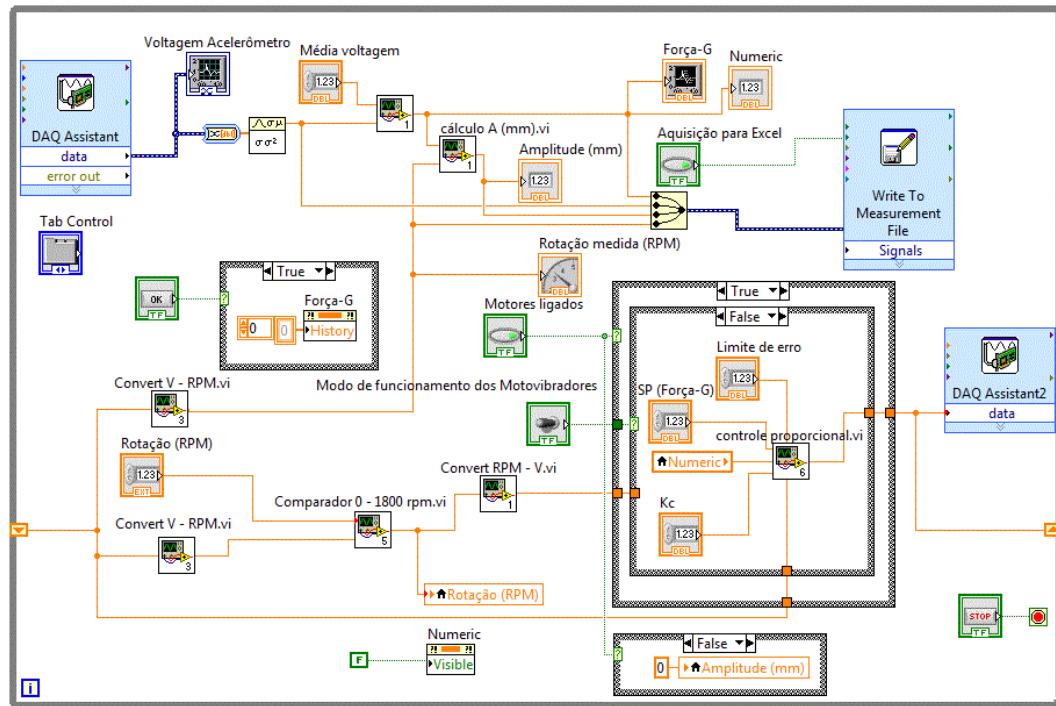
Figura 3.6 – Placa para aquisição de sinal do acelerômetro e geração de sinal para o inversor de frequência



Figura 3.7 – Inversor de frequência utilizado para controlar a rotação dos motovibradores

3.5 Metodologia para realização dos experimentos

Inicialmente uma tela foi montada em um quadro que podia ser removido do corpo da peneira em caso de necessidade. Cada tela montada possuía área de peneiramento de 40 cm x 1,0 m. Após a montagem, a suspensão inicial era preparada com 1% em volume de rocha fosfática e 10 gramas de goma xantana no interior do tanque principal com agitação de forma a evitar a

Figura 3.8 – Painel frontal criado em *Labview* para operação da unidadeFigura 3.9 – Diagrama de blocos criado em *Labview* para operação da unidade

sedimentação do sólido e entupimento na tubulação do tanque. Enquanto isso a peneira era ligada e através da frequência de vibração os valores de força-g eram monitorados até que o sistema alcançasse o *set-point* ou valor predeterminado do planejamento de experimentos. A superfície de peneiramento era lubrificada com água de modo a minimizar o dano causado por atrito no

transporte inicial de material retido. Assim que este *set-point* fosse atingido, o peneiramento começava, enquanto que a frequência era manipulada de maneira automática a fim de se manter a vibração no valor predeterminado, pois conforme a suspensão era adicionada à tela da peneira, a tendência era de que a força-g diminuísse de intensidade. Todo o processo de manipulação da rotação e monitoramento da força-g foi executado pelo software *LabView* 2013.

A alimentação à peneira era realizada abrindo-se a válvula manual do tanque para descarga da suspensão sobre uma calha de aço inoxidável (Figura 3.10) para que o material fosse distribuído uniformemente ao longo da largura da tela da peneira. A partir deste momento, iniciava-se a contagem do tempo de duração do experimento.



Figura 3.10 – Calha utilizada para melhor distribuição de alimentação na peneira

Após esgotada toda a suspensão do tanque de alimentação, o tempo de peneiramento era anotado, o material retido era coletado em um balde e devidamente pesado em uma balança analítica, e o material passante era totalmente recolhido no tanque de coleta (Figura 3.11). O valor da massa total de material retido é fundamental para o cálculo da eficiência granulométrica.



Figura 3.11 – Saídas da peneira: material retido à esquerda e passante à direita

Ainda em relação a este material, três amostras eram separadas para a realização do teor de umidade em estufa a 105 °C por 24 horas. Após a pesagem das amostras para cálculo do teor de umidade, parte do sólido seco era coletado para realização da análise granulométrica no *Mastersizer*. O mesmo procedimento de amostragem foi seguido para análise de tamanho de partícula do material passante.

Após a coleta de amostras para análises, o material retido era retornado para o tanque principal manualmente e o apenas o líquido era retornado através de uma bomba centrífuga localizada na saída do tanque secundário, sendo que os sólidos úmidos que passaram pelas aberturas da tela permaneceram no fundo do tanque. Essa massa de sólidos úmida era coletada e retornada ao tanque principal manualmente. O processo de agitação era realizado novamente para preparação da suspensão para o próximo experimento. Todas os experimentos estabelecidos pelo planejamento foram realizados em triplicata, e para cada um o teor de umidade foi realizado também em triplicata.

Assim que finalizados todos os experimentos variando-se a vibração, a suspensão de 2% era preparada adicionando-se mais sólidos à suspensão anterior até a quantidade calculada para a concentração estabelecida. E após a realização de todas as corridas com essa concentração, a adição de mais rocha fosfática era realizada até a concentração de 3%.

Após a execução de todos os experimentos referentes a aquela tela, a mesma era trocada por outra tela de abertura diferente para execução dos próximos experimentos. E assim foi adotada a mesma sistemática descrita até que se utilizasse todas as três telas. O tempo médio de peneiramento foi de 18 minutos. O número de experimentos realizados totalizou 81 (27 experimentos do planejamento e suas respectivas triplicatas).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho são apresentados em forma de tabela e com ajustes de superfícies de cada resposta, assim como equações matriciais representativas na região experimental utilizada neste trabalho, mostrando os principais efeitos das variáveis de interesse do peneiramento.

Para se obter uma superfície de resposta que represente os dados experimentais, é necessário ter uma equação que correlacione a resposta y com as variáveis x_i . Uma equação bastante utilizada é representada pela Equação 4.1 que considera efeitos das variáveis x_i tanto individuais quanto quadráticos e de interação, bem como o erro de ajuste associado ε .

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1, i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (4.1)$$

Tendo em mãos todos os valores experimentais, através do método dos mínimos quadrados é possível estimar os parâmetros β_i , β_{ii} e β_{ij} da Equação 4.1, por sua vez chamados de estimadores de mínimos quadrados (EMQ), representados por b_i , b_{ii} e b_{ij} apresentados na Equação 4.2, através de uma regressão não-linear múltipla. A obtenção de tais estimadores visa a minimização do erro ε associado à equação de regressão proposta (RODRIGUES; IEMMA, 2009).

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1, i < j}^k b_{ij} x_i x_j \quad (4.2)$$

Por regressão não-linear múltipla, pôde-se calcular os estimadores relacionados às variáveis codificadas x_1 (tela), x_2 (concentração volumétrica) e x_3 (força-g) de acordo com a metodologia estatística descrita no Anexo A, com nível de significância α de 5%. Os resíduos gerados pelas regressões deste trabalho estão apresentados em gráficos no Apêndice C.

Foi realizada também uma análise de otimização para a localização do teor de umidade mínimo e eficiência granulométrica máxima dentro da região experimental estudada, assim como a localização de uma condição de operação ótima que contemple ambas as respostas. Para o diâmetro de corte a análise teve por finalidade verificar a relação deste com as variáveis de processo escolhidas neste trabalho, analisando cada tela separadamente, e ainda assim, verificar qual a relação entre d_{50} e eficiência granulométrica.

4.1 Respostas Observadas

A tabela que contempla as respostas dos 81 experimentos se encontra no Apêndice B. Porém para apresentação de resultados neste capítulo, foi necessário eliminar os *outliers*⁸ das respostas

⁸Outlier é uma observação com comportamento extremamente diferente dos demais (PORTAL ACTION, 2015).

experimentais obtidas para melhor compreensão dos resultados. A Tabela 4.1 apresenta as médias e os desvios padrão das respostas obtidas das triplicatas de cada experimento do planejamento.

Tabela 4.1 – Valores experimentais das variáveis respostas: médias e desvios para cada experimento do planejamento fatorial

Experim.	Variáveis			Umidade (%)		Eficiência (%)		d_{50} (μm)	
	x_1	x_2	x_3	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
1	-1	-1	-1	21,62	0,32	80,90	2,08	187,04	21,52
2	-1	-1	0	20,57	1,58	79,86	1,44	178,61	7,84
3	-1	-1	+1	19,28	0,83	79,58	1,95	152,98	4,18
4	-1	0	-1	18,67	0,04	78,87	0,18	143,41	8,20
5	-1	0	0	18,32	0,50	77,33	1,15	130,00	0,00
6	-1	0	+1	18,48	0,23	78,12	2,33	112,87	9,03
7	-1	+1	-1	18,47	0,10	77,32	1,74	152,26	3,62
8	-1	+1	0	18,28	0,16	76,58	0,55	128,54	1,32
9	-1	+1	+1	19,27	0,48	76,31	1,30	114,80	8,59
10	0	-1	-1	22,04	1,17	86,44	0,77	133,18	4,53
11	0	-1	0	21,39	0,73	84,81	1,84	124,09	3,16
12	0	-1	+1	22,50	0,72	85,09	1,76	100,65	5,51
13	0	0	-1	20,03	1,12	84,67	2,95	118,27	1,64
14	0	0	0	20,28	0,97	82,69	1,71	97,96	6,55
15	0	0	+1	21,19	0,73	81,58	1,92	92,13	0,94
16	0	+1	-1	18,73	0,57	80,25	1,41	120,03	0,50
17	0	+1	0	20,57	0,86	78,42	0,27	121,37	3,37
18	0	+1	+1	21,03	0,37	78,38	0,66	113,61	10,76
19	+1	-1	-1	21,99	1,36	84,38	0,51	102,95	2,79
20	+1	-1	0	21,94	0,48	83,12	2,64	104,10	2,18
21	+1	-1	+1	20,83	0,06	82,73	1,20	102,93	2,64
22	+1	0	-1	18,85	0,54	84,42	1,42	93,44	0,21
23	+1	0	0	18,88	0,44	83,28	0,90	92,85	0,93
24	+1	0	+1	20,03	0,18	80,73	2,50	88,96	2,06
25	+1	+1	-1	17,29	0,39	83,78	2,57	92,80	0,06
26	+1	+1	0	18,73	0,31	78,86	2,05	88,36	4,35
27	+1	+1	+1	20,47	0,68	78,11	2,77	82,34	3,01

Através da análise da Tabela 4.1, é possível observar que os experimentos 12 e 25 geraram o maior e o menor valor do teor de umidade (22,50% e 17,29%) respectivamente. O experimento 12 é caracterizado pelo nível mais baixo de concentração volumétrica ($x_2 = -1$) e o mais alto de força-g ($x_3 = +1$) enquanto que o inverso ocorre para o experimento 25. Este fato indica que o aumento da concentração tem influência positiva na redução do teor de umidade, enquanto que o aumento da força-g contribui de maneira negativa para essa resposta.

Ainda em relação à tabela de resultados experimentais, nota-se que os experimentos 9 e 10 levaram ao menor e ao maior valor da eficiência granulométrica (76,31% e 86,44%) respectivamente, sendo que o experimento 9 é caracterizado pelos maiores níveis de concentração e força-g ($x_2 = x_3 = +1$) para a tela de 125 *mesh* enquanto que o experimento 10 se caracteriza pelo menores níveis ($x_2 = x_3 = -1$), porém para a tela de 150 *mesh*. Tal constatação indica que o emprego da concentração e da força-g mais baixas leva à melhor eficiência de separação e as mesmas variáveis nos níveis mais altos levam à pior.

No que se refere aos diâmetros de corte (d_{50}) obtidos experimentalmente, é possível constatar que os experimentos 6, 15 e 27 geraram os menores valores para cada tela utilizada – 112,87 μm para 125 *mesh*; 92,13 μm para 150 *mesh* e 82,34 μm para 175 *mesh*, respectivamente. Os três experimentos têm em comum o emprego da vibração mais intensa ($x_3 = +1$ ou $\Gamma = 3,5 \text{ g}$), podendo indicar que maiores vibrações implicam em maior coleta de partículas menores no material retido pela tela da peneira.

4.2 Análise de significância: Teor de Umidade e Eficiência Granulométrica

Para a avaliação dos estimadores dos parâmetros significativos do teor de umidade do material retido e da eficiência granulométrica, são apresentadas as Equações 4.3 e 4.4 em forma matricial seguindo o formato da Equação A.8 que pode ser encontrada no Anexo A.

$$H(\%) = 20,285 + \underline{x}' \begin{bmatrix} 0,336 \\ -1,075 \\ 0,301 \end{bmatrix} + \underline{x}' \begin{bmatrix} -1,307 & 0 & 0,206 \\ 0 & 0,865 & 0,388 \\ 0,206 & 0,388 & 0 \end{bmatrix} \underline{x} \quad (4.3)$$

$$\eta(\%) = 82,480 + \underline{x}' \begin{bmatrix} 1,919 \\ -2,162 \\ -1,133 \end{bmatrix} + \underline{x}' \begin{bmatrix} -2,243 & 0 & -0,331 \\ 0 & 0 & 0 \\ -0,331 & 0 & 0 \end{bmatrix} \underline{x} \quad (4.4)$$

Sendo \underline{x}' o vetor linha que representa as variáveis de entrada na forma codificada, ou seja, $\underline{x}' = [x_1 \ x_2 \ x_3]$.

Os coeficientes de determinação R^2 foram de 90,97% e 89,73% para o ajuste do teor de umidade e da eficiência granulométrica, respectivamente. Levando-se em consideração as dificuldades encontradas para a obtenção das respostas, as regressões utilizadas para suas previsões são consideradas satisfatórias.

Analizando a Equação 4.3, nota-se que o teor de umidade do material retido é afetado por quase todos os parâmetros, com exceção de b_{12} e b_{33} . Uma vez que o desejado é alcançar o menor valor para esta variável resposta dentro da região experimental, observa-se que apenas o

termo linear da concentração volumétrica e o termo quadrático da tela favorece a redução do teor de umidade ($b_2 < 0$ e $b_{11} < 0$).

Em relação à regressão da eficiência granulométrica, apresentada pela Equação 4.4, constata-se que o termo quadrático de concentração volumétrica e os termos de interação envolvendo essa variável não são significativos para a previsão da resposta. Com a intenção de alcançar o maior valor de eficiência dentro da região experimental, apenas o termo linear da tela favorece o aumento desta resposta ($b_1 > 0$).

A Figura 4.1 mostra as superfícies de resposta representada pela Equação 4.3.

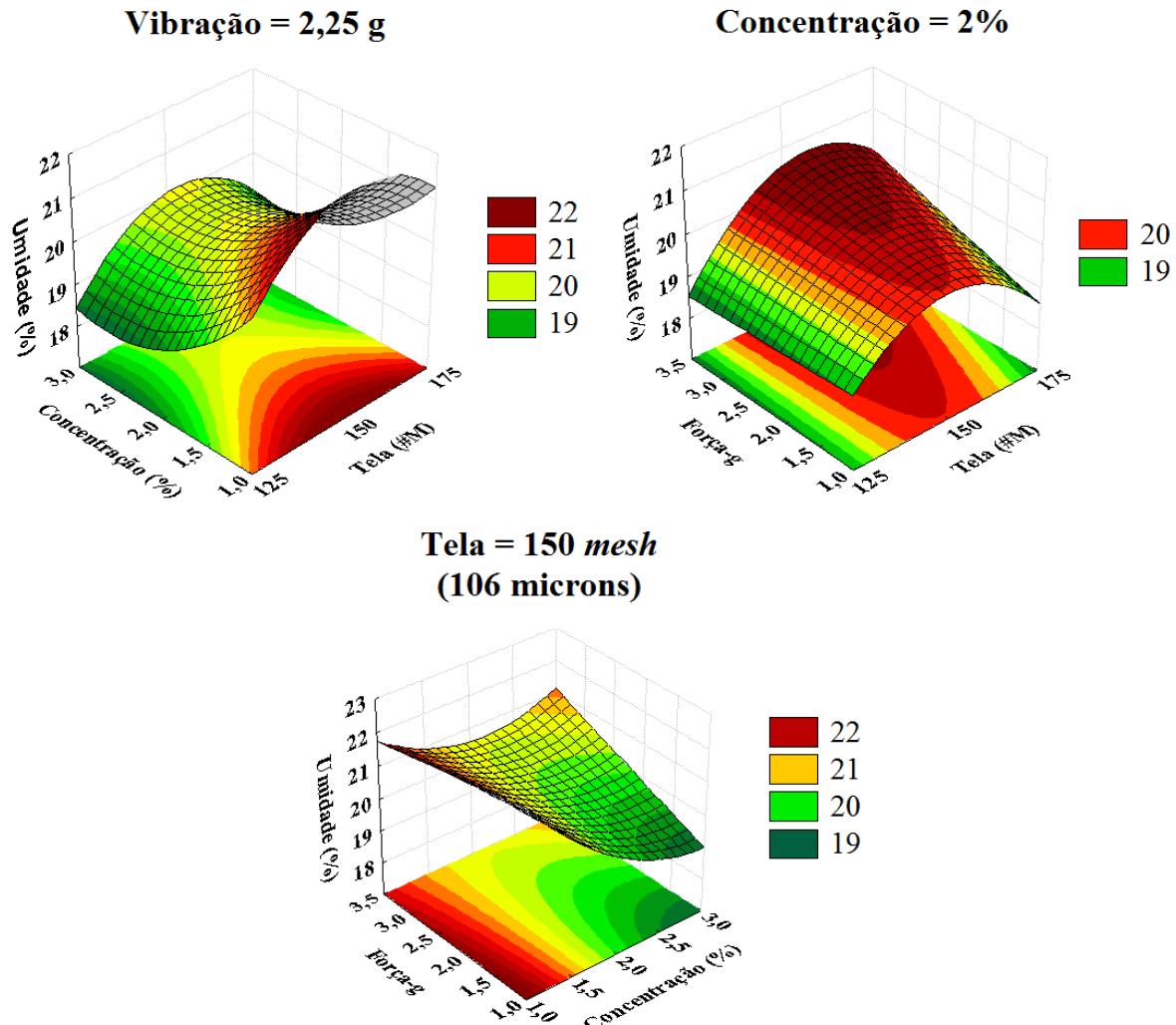


Figura 4.1 – Superfícies de resposta para o teor de umidade do material retido

Os menores teores de umidade são atingidos nos níveis extremos da tela (125 e 175 mesh), visto que o termo quadrático desta variável é o que possui maior influência na resposta. Além disso, a umidade diminui à medida que a concentração volumétrica e a força-g diminuem.

Localizando dentro da região experimental o ponto de mínimo teor de umidade de material retido através do *software GAMS*, a condição encontrada é a de tela de 175 mesh , concentração volumétrica de 3% e força-g de intensidade $1,0$. Tal condição está de acordo com o que foi

verificado experimentalmente (Tabela 4.1), em especial no experimento 25, sendo o teor de umidade mínimo observado de 17,29%, enquanto que o previsto pela regressão vale 17,43%, tendo assim um erro relativo entre o medido e o previsto pela Equação 4.3 de 0,81%.

Essa condição pode ser explicada pelo fato de que a tela de 175 *mesh* possui menor tamanho de abertura, e também pela maior quantidade de material sobre a peneira que leva a uma maior pressão hidrostática, e junto com um maior tempo de residência que o material fica retido na peneira, proporcionado pela força-g menos intensa, que acaba por beneficiar o desague desse material retido.

A Figura 4.2 apresenta as superfícies de resposta gerada pela Equação 4.4 para a eficiência granulométrica.

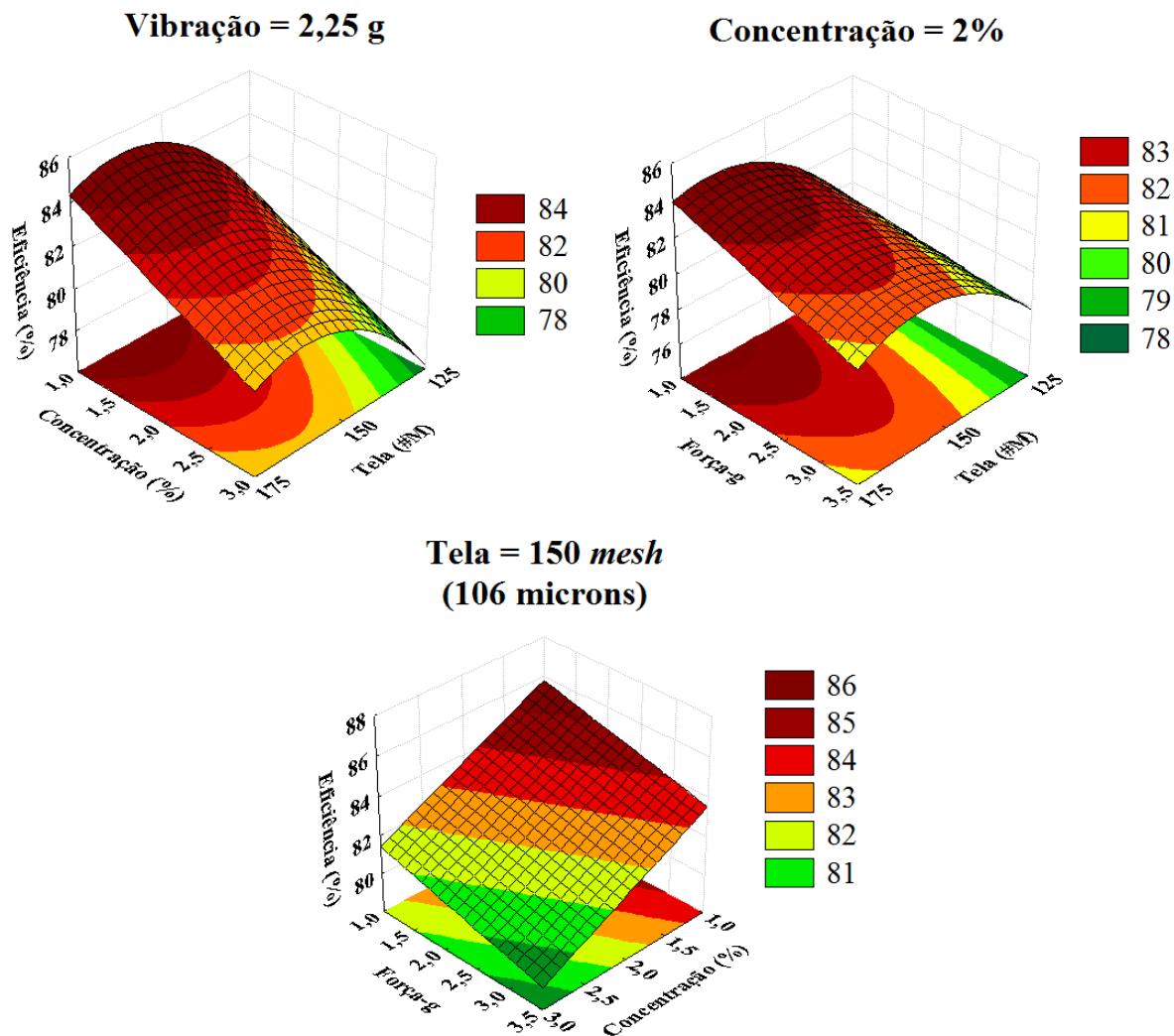


Figura 4.2 – Superfícies de resposta para a eficiência granulométrica

Observa-se que os maiores valores de eficiência granulométrica são obtidos com a diminuição da concentração volumétrica e da força-g, já que seus termos lineares desfavorecem o aumento da resposta (b_2 e $b_3 < 0$). Nota-se também que a região entre 150 e 175 *mesh* leva a maiores valores de eficiência.

A condição de máxima eficiência dentro da região experimental encontrada por otimização é a de tela cuja variável codificada é $x_1 = +0,563$, concentração volumétrica de 1% e vibração de 1,0 g, sendo o máximo predito como 86,20%. Porém, a partir da análise da Tabela 4.1, o valor máximo observado é de 86,44% (experimento 10) nas mesmas condições de concentração e força-g mas com a tela de 150 *mesh*.

Essa condição de eficiência granulométrica máxima observada experimentalmente pode ser explicada pelo favorecimento da separação em relação ao desague do material retido proporcionado pela menor quantidade de sólidos alimentada que leva a uma menor competição pelas aberturas da tela e também pelo maior tempo de residência do material sob a superfície de peneiramento promovido pela menor força-g. Tal explicação se encontra de acordo com Wills e Napier-Munn (2006).

4.2.1 Ponto ótimo entre umidade e eficiência granulométrica

Para se encontrar um ponto ótimo de operação que conte a teor de umidade do material retido e eficiência granulométrica global de separação, a otimização dentro da região experimental foi realizada com o auxílio do *software GAMS* utilizando a função objetivo descrita pela Equação 3.4, que leva em consideração as equações de ajuste para estas duas respostas. Assim, o ponto ótimo de operação é em $x_1 = +1$, $x_2 = +0,462$ e $x_3 = -1$ (ou tela de 175 *mesh*, concentração volumétrica de 2,46% e vibração de 1,0 g), sendo 17,87% e 83,57% os valores de teor de umidade e eficiência granulométrica, respectivamente. Logo, nota-se que o emprego da tela com menor tamanho de abertura e uma vibração mais branda favorece ambas as respostas até então analisadas.

4.3 Análise de significância: Diâmetro de Corte

O tratamento de dados e análise de efeitos de variáveis foi realizado para cada tela separadamente, visto a especificidade de aberturas diferentes para cada tela utilizada. Vale frisar que neste trabalho o diâmetro de corte calculado se refere ao material retido pela tela.

As equações de ajuste para os diâmetros de corte estão representadas pelas Equações 4.5, 4.6 e 4.7.

$$d_{50}^{\#125} (\mu m) = 128,757 + \underline{x}' \begin{bmatrix} -20,504 \\ -17,011 \end{bmatrix} + \underline{x}' \begin{bmatrix} 23,614 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \underline{x} \quad (4.5)$$

$$d_{50}^{\#150} (\mu m) = 102,785 + \underline{x}' \begin{bmatrix} 0 \\ -10,848 \end{bmatrix} + \underline{x}' \begin{bmatrix} 16,034 & 3,264 \\ 3,264 & 0 \end{bmatrix} \underline{x} \quad (4.6)$$

$$d_{50}^{\#175} (\mu m) = 92,546 + \underline{x}' \begin{bmatrix} -7,749 \\ -2,493 \end{bmatrix} + \underline{x}' \begin{bmatrix} 3,833 & -1,304 \\ -1,304 & 1,199 \end{bmatrix} \underline{x} \quad (4.7)$$

Sendo \underline{x}' o vetor linha que representa as variáveis de entrada na forma codificada com a ausência de x_1 já que a tela é fixa, ou seja, $\underline{x}' = [x_2 \ x_3]$.

Os coeficientes de determinação R^2 foram de 98,53%; 93,34% e 99,90% para os ajustes de diâmetros de corte das telas de 125, 150 e 175 *mesh*, respectivamente. As regressões utilizadas para suas previsões conseguem explicar as variabilidades dos dados melhor que as duas respostas anteriores.

Analizando-se as equações de maneira geral, nota-se que os termos lineares significativos levam à diminuição do d_{50} (b_2 e $b_3 < 0$), e o termo quadrático de concentração volumétrica conduz ao aumento da resposta ($b_{22} > 0$). Os demais termos significativos não mantiveram uma tendência em relação ao sinal e o efeito da concentração volumétrica é o que possui mais significância, seja na forma quadrática (Equações 4.5 e 4.6) ou linear (Equação 4.7). Porém, apesar de ser mais significativa, a concentração volumétrica não apresenta uma tendência em comum para as três telas.

A Figura 4.3 mostra as superfícies de resposta para cada tela utilizada nos experimentos.

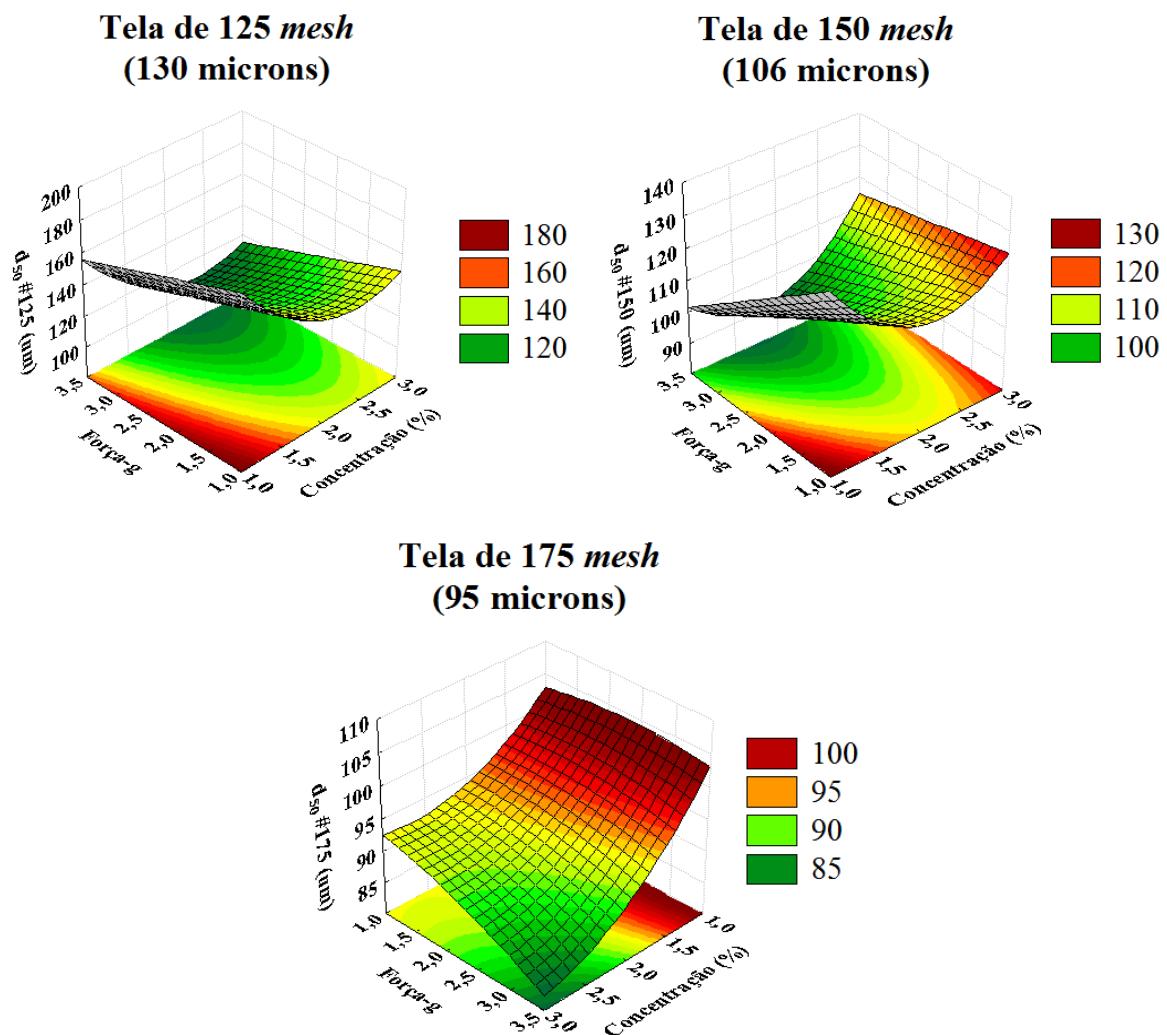


Figura 4.3 – Superfícies de resposta para o diâmetro de corte referente à três telas

Analizando-se as superfícies de resposta das três telas, constata-se que o aumento da força diminui o diâmetro de corte. Tal constatação pode ser explicada pelo fato de que a maiores

vibrações, o transporte de material retido se torna mais rápido, resultando em um menor número de colisões entre partícula e tela, ocasionando uma menor chance destas partículas passarem pelas aberturas da tela, o que faz com a curva de separação se desloque para a esquerda. O transporte mais rápido de material pela tela da peneira traz o benefício de diminuir o tempo em que partículas maiores que as aberturas são forçadas a passarem pelas aberturas da tela.

4.4 Relação entre d_{50} e eficiência granulométrica

No que se refere ao controle de sólidos, é importante que a peneira vibratória retenha a maior quantidade de material particulado possível para facilitar o desempenho dos equipamentos subsequentes. Assim, quanto menor o diâmetro de corte, maior será essa coleta de partículas. Porém, da análise do diâmetro de corte em si, pouco se sabe a respeito da eficiência de separação global em relação ao tamanho de partículas e as aberturas das telas. A partir deste cenário, a Figura 4.4 apresenta a relação entre as respostas obtidas neste trabalho: eficiência granulométrica global e diâmetro de corte.

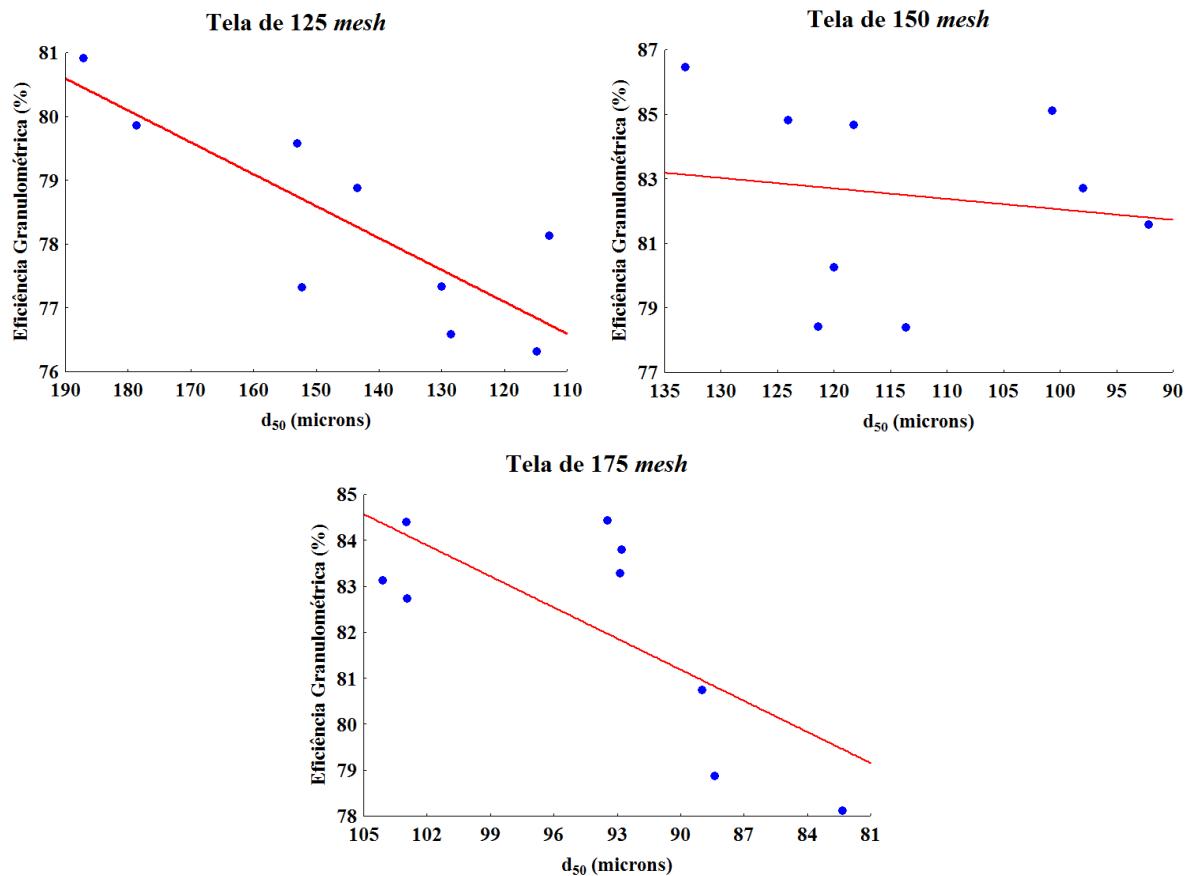


Figura 4.4 – Relação entre eficiência granulométrica global e diâmetro de corte referente à corrente de material retido

É possível observar pela Figura 4.4 que há uma tendência de redução da eficiência global a partir do decréscimo do d_{50} , ou seja, a maior coleta de sólidos que ficam retidos pela tela da peneira prejudica a separação que leva em consideração o tamanho das partículas. Sob o

ponto de vista das variáveis de processo, a força-g tem papel fundamental, pois o seu menor valor dentro da faixa experimental maximiza a eficiência de separação granulométrica, o que é desejável, porém o seu maior valor minimiza o diâmetro de corte, que também é desejável. Vale ressaltar que, a eficiência granulométrica global escolhida como resposta para este trabalho leva em consideração a correta separação de partículas de tamanho acima e abaixo da abertura de cada tela de peneiramento, o que engloba a distribuição de tamanho de partículas do material retido pela tela e também do material particulado que passou pelas aberturas.

Posteriores análises dos resultados obtidos neste trabalho devem ser feitas a partir de um tamanho de partícula de referência fixo para as três telas, para que se possa avaliar apenas a eficiência granulométrica do material retido, de forma a obter uma relação que beneficie eficiência e diâmetro de corte.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

A partir dos resultados obtidos nos experimentos, é possível concluir que:

1. A região de mínimo teor de umidade foi alcançada na condição de tela de 175 *mesh*, concentração volumétrica de 3% e 1,0 g;
2. Esse mínimo pode ser explicado pelo fato de que a tela de 175*mesh* possui menor tamanho de abertura, e também pela maior quantidade de material sob a peneira que leva a uma maior pressão hidrostática, e junto com um maior tempo de residência que o material fica retido na peneira, proporcionado pela força-g menos intensa, levando ao beneficiamento do desague desse material retido;
3. A região de máxima eficiência granulométrica foi alcançada na condição de tela de 150 *mesh* e concentração volumétrica de 1% e vibração de 1,0 g;
4. A constatação desse máximo pode ser explicada pelo favorecimento da separação em relação ao desague do material retido proporcionado pela menor quantidade de sólidos alimentada que leva a uma menor competição pelas aberturas da tela e também pelo maior tempo de residência do material sob a superfície de peneiramento promovido pela força-g menos intensa;
5. Há um ponto ótimo de operação que contemple um baixo teor de umidade de material retido e uma alta eficiência granulométrica global de separação. Com o auxílio do *software GAMS*, este ponto é alcançado com tela de 175 *mesh*, concentração volumétrica de 2,46% e vibração de 1,0 g. Assim, conclui-se que o emprego da tela com menor tamanho de abertura e uma vibração mais branda favorece ambas as repostas até então analisadas;
6. O aumento da força-g diminui o diâmetro de corte. Tal conclusão pode ser explicada pelo fato de que a maiores vibrações, o transporte de material retido se torna mais rápido, diminuindo o número de colisões entre as partículas e a tela da peneira, o que resulta em uma menor chance de passagem destas pela tela, fazendo com a curva de separação se desloque para a esquerda;
7. Analisando-se a relação entre diâmetro de corte e eficiência granulométrica global de separação, nota-se uma tendência de redução dessa eficiência com o decréscimo do d_{50} . Essa conclusão pode ser obtida sob o ponto de vista da força-g, que tem papel fundamental na análise, pois o seu menor valor dentro da faixa experimental maximiza a eficiência de separação granulométrica, o que é desejável, porém o seu maior valor minimiza o diâmetro de corte, que também é desejável.
8. A variável mais importante do peneiramento, a vibração (ou força-g), contribui para a

obtenção do mínimo teor de umidade e máxima eficiência de separação desde que seu emprego seja de forma menos intensa, porém não beneficia a coleta de sólidos retidos, sendo representado pelo diâmetro de corte.

5.2 Sugestões

Algumas sugestões são descritas a partir das dificuldades encontradas no desenvolvimento deste trabalho e na elaboração de futuros projetos:

1. Melhorar o sistema de mistura do tanque de alimentação de forma a manter a suspensão a mais homogênea possível para a realização de futuros experimentos;
2. Instalar motovibradores com maior potência para realizar experimentos utilizando vibrações maiores que 3,5 g;
3. Instalar sensores de vazão, de nível do tanque e de carga de modo a melhorar o acompanhamento das variáveis de interesse ao longo dos experimentos;
4. Usar fluido de perfuração no lugar da suspensão de rocha fosfática utilizada neste trabalho.
5. Realizar a análise dos resultados a partir de um tamanho de partícula de referência fixo para as três telas a fim de se avaliar apenas a eficiência granulométrica do material retido para obtenção de uma relação que beneficie eficiência granulométrica e diâmetro de corte.

REFERÊNCIAS

- AADE. *Shale Shakers and Drilling Fluid Systems*. Houston, Texas: Gulf Publishing Company, 1999.
- ALLEN, T. *Particle Size Measurement*. 5. ed. London: Chapman & Hall, 1997.
- AMOCO. *Drilling Fluids Manual*. USA, 1994. 444p.
- ASME. *Drilling Fluid Processing Handbook*. Burlington, USA: Gulf Professional Publishing, 2005.
- BARROS, B. N.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. *Como fazer experimentos: Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria*. Campinas: Unicamp, 2001.
- BARROZO, M. A. S. Notas de aula da disciplina de planejamento de experimentos. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia. 2013.
- BOX, G. E. P.; HUNTER, J. S.; HUNTER, W. G. *Statistics for Experimenters: Design, Innovation and Discovery*. 2. ed. USA: Wiley-Interscience, 2005. (Wiley Series In Probability And Statistics).
- DAHL, B.; SAASEN, A.; OMLAND, T. H. Successful drilling of oil and gas wells by optimal drilling-fluid solids control - a practical and theoretical evaluation. In: *IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition*. Bangkok, Thailand: [s.n.], 2006.
- DORRY, K. E. Effect of constant-g control on shale shaker performance. In: *AADE Fluids Conference and Exhibition*. Houston, Texas: [s.n.], 2010.
- FERREIRA, J. F. *Modelagem e Simulação do Processo de Separação Sólido-Líquido para Reciclagem do Fluido de Perfuração Usado em Poços de Petróleo I: Peneiras Vibratórias*. Monografia (Projeto de Graduação) — Faculdade de Engenharia Química - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG, 2010.
- FOWLER, R. T.; LIM, S. C. The influence of various factor upon the effectiveness of separation of a finely divided solid by a vibrating screen. *Chemical Engineering Science*, v. 10, p. 163–170, 1959.
- GN SOLIDS CONTROL. *Operating Principle of Hydrocyclone*. China, 2010. Acesso em: 10/03/2015. Disponível em: <<http://www.gn-shale-shaker.com/operating-principle-of-hydrocyclone/>>.
- HOBEROCK, L. L. Screen selection is key to shale-shaker operation. *Oil & Gas Journal*, n. 79, p. 130–132, 137–141, 1981.
- LARSON, R. T. Api rp 13c d100 values, split curves, and separation efficiency. In: *AADE National Technical Conference and Exhibition*. Houston, Texas: [s.n.], 2007. Acesso em: 30/06/2013. Disponível em: <<http://www.aade.org/app/download/7050506604/AADE-07-NTCE-53.pdf>>.
- M-I SWACO. *Drilling Fluids Engineering Manual*. [S.I.], 2001. 788p.

- MACHADO, J. C. V. *Reologia e escoamento de fluidos: ênfase na indústria do petróleo*. Rio de Janeiro: Interciênciam, 2002. 259p.
- MOREIRA, R. de F. P. M. *Peneiramento*. 2003. Notas de Aula, Disciplina de Operações Unitárias de Transferência de Quantidade de Movimento, Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina. Acesso em: 17/09/2014. Disponível em: <<http://www.enq.ufsc.br/disci/eqa5313/Peneiramento.html>>.
- MORGENTHALER, M.; ROBINSON, L. Cut-point data: Relevant, irrelevant, or irreverent? In: *AADE National Technical Conference and Exhibition*. Houston, Texas: [s.n.], 2007. Acesso em: 30/06/2013. Disponível em: <<http://www.aade.org/app/download/7050506004/AADE-07-NTCE-52.pdf>>.
- ONWUKWE, S. I.; NWAKAUDU, M. S. Drilling waste generation and management approach. *International Journal of Environment Science and Development*, v. 3, n. 2, p. 252–257, June 2012.
- PEREIRA, M. S. *Caracterização de cascalho e lama de perfuração ao longo do processo de controle de sólidos em sondas de petróleo e gás*. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Química - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG, Dez. 2010.
- PEREIRA, M. S. *Aplicação de secagem por microondas no tratamento de cascalho de perfuração*. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia Química - Universidade Federal de Uberlândia, 2013.
- PORTAL ACTION. *Diagnóstico de Outliers*. São Carlos, 2015. Acesso em 02/03/2015. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/923-diagnóstico-de-outliers>>.
- PRECISION MICRODRIVES. *AB-004 : Understanding ERM Vibration Motor Characteristics*. London, UK, 2014. Acesso em: 23/09/2014. Disponível em: <<http://www.precisionmicrodrives.com/application-notes-technical-guides/application-bulletins/ab-004-understanding-erm-characteristics-for-vibration-applications>>.
- RAJA, V. *Shale Shaker and Experimental Validation*. Tese (PhD) — University of Akron, Akron, Aug. 2012. Acesso em: 15/09/2014. Disponível em: <https://etd.ohiolink.edu/ap/10?0::NO:10:P10_ACCESSION_NUM:akron1343768902>.
- RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. *Planejamento de Experimentos & Otimização de Processos*. 2. ed. Campinas: Cárita Editora, 2009.
- SANTOS, O. L. A. *Segurança de poço na perfuração*. São Paulo: Blucher, 2013. 208p.
- SCHAFFEL, S. B. *A questão Ambiental na Etapa de Perfuração de Poços Marítimos de Óleo e Gás no Brasil*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002. 130p.
- SCHULZ, N. F. Separation efficiency. *Transactions of the SME-AIME*, v. 247, p. 81–87, 1970.
- SCOTT, E. L. Automatic shaker control. In: *IADC/SPE Drilling Conference*. Miami, Florida: [s.n.], 2006.
- SILVA, D. O. *Otimização da Separação Sólido-Líquido em Hidrociclonas mediante Modificações Geométricas*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

- SOUZA, M. R. *Avaliação do Ciclo de Vida dos Constituintes dos Fluidos de Perfuração em Poços de Petróleo*. Dissertação (Mestrado) — COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Acesso em: 18/12/2014. Disponível em: <http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe_m/MarcelleRodriguesDeSouza.pdf>.
- SWECO. *Decanter Centrifuges Features*. Florence, USA, 2013. Acesso em: 10/03/2015. Disponível em: <<http://www.sweco.com/news/news-nl-201305-plant-effluent-screener.aspx>>.
- THOMAS, J. E. *Fundamentos da Engenharia de Petróleo*. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.
- TRUMIC, M.; MAGDALINOVIC, N. New model of screening kinetics. *Minerals Engineering*, n. 24, p. 42–49, 2011.
- WILLS, B. A.; NAPIER-MUNN, T. J. *Will's Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. 7. ed. [S.l.]: Elsevier Science & Technology Books, 2006.

ANEXO A

Metodologia estatística aplicada no tratamento de resultados experimentais

Análise dos resíduos e teste de hipóteses

ASSIM como toda equação de regressão com a função de representar os valores observados y_i , há resíduos associados, que são erros dos valores preditos pela regressão em relação aos observados. O resíduo é apresentado na Equação A.1.

$$\varepsilon_i = y_i - \hat{y}_i \quad (\text{A.1})$$

A análise dos resíduos é fundamental para que se possa avaliar a qualidade do ajuste de qualquer equação de ajuste. Se um determinado ajuste deixa resíduos consideráveis, ele não é considerado bom. No ajuste ideal, todas as previsões (ou preibições) coincidiriam exatamente com as respostas observadas, e não haveria resíduo algum. O método mais utilizado para avaliação numérica da qualidade do ajuste é a Análise da Variância. Para a realização da análise da variância de uma regressão, uma decomposição algébrica dos desvios das respostas observadas é realizada em relação à resposta média global \bar{y} (BARROS et al., 2001). O desvio de uma resposta individual em relação à média de todas as respostas observadas, $(y_i - \bar{y})$, pode ser decomposto em duas parcelas, como mostrado na Equação A.2.

$$(y_i - \bar{y}) = (\hat{y}_i - \bar{y}) + (y_i - \hat{y}_i) \quad (\text{A.2})$$

A primeira parcela, $(\hat{y}_i - \bar{y})$, representa o desvio da previsão feita pelo ajuste para o ponto em questão, \hat{y}_i , em relação à média global, \bar{y} . A segunda parcela é a diferença entre o valor observado e o valor predito. Numa regressão bem ajustada, essa segunda diferença deve ser pequena. Isto equivale a dizer, em termos da Equação A.2, que o desvio $(y_i - \bar{y})$ deve ser aproximadamente igual ao desvio $(\hat{y}_i - \bar{y})$. Dizer que os desvios dos valores preditos pelo ajuste são semelhantes aos desvios dos valores observados (ambos em relação à média) é outra maneira de dizer que as preibições estão em boa concordância com as observações.

O próximo passo é expressar esta comparação de desvios em termos quantitativos. Para isto, elevam-se os desvios da Equação A.2 ao quadrado e em seguida é feito o somatório sobre todos os pontos.

$$\sum (y_i - \bar{y})^2 = \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (\text{A.3})$$

Estas somas de quadrados de desvios costumam ser chamadas de somas quadráticas (SQ). Assim, pode-se ler a Equação A.3 como (SQ em torno da média)= (SQ devido à Eq. regressão)

+ (SQ dos resíduos), ou numa forma mais compacta:

$$SQT = SQE + SQR \quad (\text{A.4})$$

Ou seja, uma parte da variação total das observações y_i em torno da média \bar{y} é explicada pela equação de regressão, e o restante fica por conta dos erros de ajuste. Uma forma de avaliar a qualidade da regressão é o cálculo do coeficiente de determinação R^2 representado pela Equação A.5.

$$R^2 = \frac{SQE}{SQT} = \frac{\sum(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \quad (\text{A.5})$$

O valor máximo de R^2 é 1 e só ocorrerá se não houver resíduo algum, o que vale dizer que toda a variação em torno da média é explicada pela regressão. Quanto mais perto de 1 estiver o valor de R^2 , melhor terá sido o ajuste às respostas observadas.

Para a análise de variância, costuma-se utilizar o quadro de ANOVA (*Analysis of Variance*) apresentado na Tabela A.1. No quadro de ANOVA, faz-se o uso das médias quadráticas (QM) das variações, definido como a razão entre SQ e o seu respectivo número de graus de liberdade (GL), sendo P o número de parâmetros da equação de ajuste e N o número de experimentos.

Tabela A.1 – Quadro de ANOVA para o ajuste da regressão. Adaptado de Barros et al. (2001)

Fonte de Variação	Soma Quadrática (SQ)	nº de GL	Média Quadrática (MQ)
Eq. de Regressão	$\sum(\hat{y}_i - \bar{y})^2$	$(P - 1)$	$\frac{SQE}{(P - 1)}$
Resíduo	$\sum(y_i - \hat{y}_i)^2$	$(N - P)$	$\frac{SQR}{(N - P)}$
Total	$\sum(y_i - \bar{y})^2$	$(N - 1)$	

A média quadrática residual (MQR) pode ser interpretada como uma medida aproximada do erro médio que se comete ao usar a equação de regressão para prever a resposta y_i .

Tendo conhecimento das médias quadráticas da equação de regressão (MQE) e residual (MQR), é necessário verificar se a equação de regressão proposta é significativa, ou seja, se a Equação 4.2 consegue explicar as respostas observadas com certo nível de significância⁹. Para tal tarefa, realiza-se o seguinte teste de hipóteses:

$$\begin{cases} H_0 : \forall \beta_i = 0 \\ H_1 : \exists \beta_i \neq 0 \end{cases}$$

A hipótese H_0 é conhecida como hipótese nula, na qual considera que todos os parâmetros, com exceção de β_0 , são nulos, ou seja, a equação de regressão escolhida não ajusta bem os valores observados. Já a hipótese H_1 , conhecida como hipótese alternativa¹⁰ considera que pelo

⁹Nível de significância é o limite tolerável de incerteza na estimativa de uma estatística

¹⁰A notação β_i deste teste de hipóteses representa também tanto β_{ii} quanto β_{ij}

menos um parâmetro da equação é significativo na análise de variância. Para verificar qual hipótese é aceita, a estatística de teste será o cálculo de F_{CALC} conforme Equação A.6.

$$F_{CALC} = \frac{MQE}{MQR} \quad (\text{A.6})$$

É necessário escolher um nível de significância α para o teste. Assim, a distribuição F de *Fischer* deve ser utilizada para obtenção do valor de $F_{\alpha;(\nu_E, \nu_R)}$, sendo ν_E o número de graus de liberdade da equação e ν_R o número de graus de liberdade dos resíduos. Se $F_{CALC} > F_{\alpha;(\nu_E, \nu_R)}$ então rejeita-se H_0 e a regressão é aceita. Caso contrário, aceita-se H_0 , sendo necessário a escolha de outra equação de regressão.

Uma vez determinados os estimadores dos parâmetros da equação, é realizado outro teste de hipóteses¹¹ para a análise da significância de cada estimador separadamente:

$$\begin{cases} H_0 : \beta_i = 0 \\ H_1 : \beta_i \neq 0 \end{cases}$$

A hipótese nula H_0 afirma que o estimador b_i não é significativo para a equação de regressão, já a hipótese alternativa H_1 afirma que tal estimador é significante. A estatística de teste será o cálculo de t_{CALC} a partir da Equação A.7.

$$t_{CALC} = \frac{b_i}{s_{bi}} \quad (\text{A.7})$$

Sendo s_{bi} o erro padrão associado àquele estimador em específico. Assim como o teste F , usa-se um nível de significância para o teste. Assim, utiliza-se a distribuição t de *Student* para obtenção do valor de $t_{\alpha; \nu_R}$, com ν_R sendo o número de graus de liberdade do resíduo. Analogamente ao teste anterior, se $|t_{CALC}| > t_{\alpha; \nu_R}$, então rejeita-se H_0 e o devido estimador é mantido. Caso contrário, aceita-se H_0 e o estimador em questão é excluído. O teste t traz a vantagem da eliminação dos parâmetros insignificantes da equação, ocasionando a redução do mesmo. Porém traz a desvantagem de diminuir a variação explicada pela regressão, ou seja, causa a diminuição do valor do coeficiente de determinação R^2 . No caso de haver eliminação de um estimador não-significativo, os erros padrão dos outros estimadores aumentam e assim deve ser necessário recalcular seus respectivos t_{CALC} para realizar novamente o teste de hipóteses, bem como a realização da Análise de Variância a fim de verificar se a equação de regressão reduzida será significativa.

Valores das distribuições F de *Fischer* e t de *Student* podem ser encontrados em tabelas ou calculados com o auxílio de softwares de Estatística.

Além dos cálculos dos testes de hipóteses, é preciso analisar a disposição dos resíduos gerados pelos ajustes. Uma forma de realização dessa análise é dispô-los em um gráfico de resíduo *versus* valores preditos. O objetivo aqui é verificar se os resíduos possuem comportamento aleatório e se são independentes entre si. Para que as inferências estatísticas aplicadas sejam corretas, a distribuição de resíduos não poderá apresentar comportamento tendencioso.,

¹¹A notação b_i neste teste de hipóteses representa tanto b_{ii} quanto b_{ij}

Superfície de resposta e análise canônica

A Equação 4.2 pode ser escrita na forma matricial, conforme Equação A.8.

$$\hat{y} = b_0 + \underline{x}' \underline{b} + \underline{x}' \underline{B} \underline{x} \quad (\text{A.8})$$

Onde \underline{x} , \underline{b} e \underline{B} são definidos pelas matrizes:

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_k \end{bmatrix}, \underline{b} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix}, \underline{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12}/2 & \cdots & b_{1k}/2 \\ b_{12}/2 & b_{22} & \cdots & b_{2k}/2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{1k}/2 & b_{2k}/2 & \cdots & b_{kk} \end{bmatrix}$$

O ponto de máxima ou mínima resposta, se existir, é dado por um conjunto de condições x_1, x_2, \dots, x_k que tornam as derivadas parciais $\frac{\partial \hat{y}}{\partial x_1}, \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_k}$ iguais a zero. Diferenciando a Equação A.8 em relação ao vetor x e igualando-a a zero, tem-se o ponto estacionário mostrado na Equação A.9.

$$\underline{x}_0 = -\frac{1}{2} \underline{B}^{-1} \underline{b} \quad (\text{A.9})$$

O ponto estacionário x_0 pode representar um ponto de máxima resposta, mínima resposta ou ainda um ponto de sela (*saddle point*) da superfície ajustada. Para determinar a natureza do ponto estacionário, deve-se realizar uma translação da superfície ajustada da origem ($x_1 = 0, x_2 = 0, \dots, x_k = 0$) até o ponto estacionário x_0 . A superfície de resposta é então expressa por novas variáveis $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k$ cujos eixos correspondem aos eixos principais do sistema de contorno. A função em termos dessas novas variáveis é chamada de forma canônica da superfície ajustada e pode ser representada pela Equação A.10.

$$\hat{y} = \hat{y}_0 + \lambda_1 \omega_1^2 + \lambda_2 \omega_2^2 + \dots + \lambda_k \omega_k^2 \quad (\text{A.10})$$

Na qual \hat{y}_0 é a resposta estimada no ponto estacionário, ou seja, $\hat{y}_0 = b_0 + \underline{x}_0' \underline{b} + \underline{x}_0' \underline{B} \underline{x}_0$. λ_i são as raízes características da matriz B . Tais valores são obtidos através da resolução do polinômio encontrado pelo $\det(B - \lambda I_k) = 0$, sendo I_k a matriz identidade de ordem k . A redução da superfície de resposta ajustada para a forma canônica é chamada de análise canônica (BARROZO, 2013).

A natureza do ponto estacionário é determinada pela análise das raízes características, juntamente com a Equação A.10.

- Se todos $\lambda_i < 0$, um deslocamento a partir do ponto estacionário em qualquer direção implicará um decréscimo na resposta. Neste caso, \underline{x}_0 é um ponto de máximo;
- Se todos $\lambda_i > 0$, um deslocamento a partir do ponto estacionário em qualquer direção implicará um acréscimo na resposta, caracterizando assim \underline{x}_0 como um ponto de mínimo;
- Se λ_i 's possuírem sinais diferentes, \underline{x}_0 é um ponto de sela.

Devido à translação de eixos da origem até o ponto estacionário, a Equação A.8 é reescrita em termos de um novo vetor \underline{z} , tal que $\underline{z} = \underline{x} - \underline{x}_0$.

$$\hat{y} = b_0 + \underline{x}'_0 \underline{b} + \underline{x}'_0 B \underline{x}_0 + \underline{z}' \underline{b} + \underline{z}' B \underline{x}_0 + \underline{x}'_0 B \underline{z} + \underline{z}' B \underline{z} \quad (\text{A.11})$$

Considerando que $\underline{z}' B \underline{x}_0 = \underline{x}'_0 B \underline{z}$ e que os três primeiros termos representam a resposta avaliada no estado estacionário, a Equação A.11 pode ser reescrita.

$$\hat{y} = \hat{y}_0 + \underline{z}' (\underline{b} + 2B \underline{x}_0) + \underline{z}' B \underline{z} \quad (\text{A.12})$$

O termo que está entre parênteses na Equação A.12 é igual a zero devido ao ponto estacionário (Equação A.9). Assim, a Equação A.13 representa a superfície de resposta de 2ª ordem ajustada após a translação para a nova origem.

$$\hat{y} = \hat{y}_0 + \underline{z}' B \underline{z} \quad (\text{A.13})$$

Para transformar a Equação A.13 para a forma canônica, realiza-se uma transformação ortogonal $\underline{z} = M \underline{\omega}$ tal que:

$$\underline{z}' B \underline{z} = \underline{\omega}' M' B M \underline{\omega} = \lambda_1 \omega_1^2 + \lambda_2 \omega_2^2 + \dots + \lambda_k \omega_k^2 \quad (\text{A.14})$$

Sendo M uma matriz de ordem k ortogonal, isto é, $M'M = I_k$, então $M' = M^{-1}$. A determinação da matriz M é importante, pois a transformação $\underline{\omega} = M' \underline{z}'$ permite relacionar as variáveis z_i (consequentemente x_i) com as variáveis canônicas ω_i . A matriz M é definida como $M = \begin{bmatrix} \underline{m}_1 & \underline{m}_2 & \dots & \underline{m}_k \end{bmatrix}$, onde \underline{m}_i é a i -ésima coluna de M , que por sua vez é a coluna do autovetor associado à raiz característica λ_i . Representando na forma matricial:

$$\underline{m}_i = \begin{pmatrix} m_{1i} \\ m_{2i} \\ \vdots \\ m_{ki} \end{pmatrix}, \text{ onde } (B - \lambda_i I_K) \underline{m}_i = 0, \text{ no qual } m_{1i}^2 + m_{2i}^2 + \dots + m_{ki}^2 = 1 \text{ (normalização dos autovetores).}$$

No caso de \underline{x}_0 ser um ponto de sela e/ou estiver fora da região experimental, a localização do ponto ótimo da superfície de resposta deve ser feita conforme o interesse do pesquisador e a relação $\underline{\omega} = M' \underline{z}'$ deve ser utilizada para se alcançar tal objetivo.

O método da Análise Canônica é apenas uma das formas de se determinar um ponto ótimo dentro da região experimental estudada dentre várias existentes na literatura. Na possibilidade de insucesso deste método, é possível recorrer a outro que consiga realizar a tarefa de maneira exitosa.

APÊNDICE A

Dados de distribuição granulométrica

Tabela A.2 – Dados da distribuição granulométrica da rocha fosfática utilizada neste trabalho

d_p (μm)	% Volume	% Acumulada	d_p (μm)	% Volume	% Acumulada
0,0500	0,0000	0,0000	9,4422	0,3170	1,8255
0,0797	0,0000	0,0000	11,6206	0,4884	2,3139
0,0981	0,0000	0,0000	14,3015	0,7552	3,0691
0,1207	0,0000	0,0000	17,6010	1,1468	4,2159
0,1486	0,0000	0,0000	21,6616	1,6976	5,9135
0,1829	0,0000	0,0000	26,6590	2,4446	8,3581
0,2251	0,0000	0,0000	32,8094	3,4219	11,7800
0,2770	0,0000	0,0000	40,3787	4,6399	16,4199
0,3409	0,0000	0,0000	49,6942	6,0575	22,4774
0,4195	0,0000	0,0000	61,1589	7,5663	30,0437
0,5163	0,0000	0,0000	75,2685	8,9732	39,0169
0,6354	0,0000	0,0000	92,6333	10,0246	49,0415
0,7820	0,1057	0,1057	114,0042	10,4698	59,5113
0,9625	0,1311	0,2368	140,3055	10,1787	69,6901
1,1845	0,1239	0,3607	172,6746	9,1866	78,8766
1,4578	0,1167	0,4774	212,5114	7,6806	86,5572
1,7941	0,1092	0,5866	261,5388	5,9369	92,4941
2,2080	0,1051	0,6918	310,0000	3,5647	96,0589
2,7174	0,1042	0,7959	350,0000	1,8263	97,8852
3,3443	0,1060	0,9019	400,0000	1,4051	99,2903
4,1159	0,1119	1,0138	450,0000	0,5671	99,8574
5,0654	0,1257	1,1395	500,0000	0,1279	99,9853
6,2340	0,1555	1,2950	540,0000	0,0147	100,0000
7,6722	0,2134	1,5084	600,0000	0,0000	100,0000

Tabela A.3 – Dados de distribuição granulométrica do cascalho utilizado por Pereira (2013)

d_p (μm)	%Massa	%Acumulada
38	1,0904	1,0904
106	10,7186	11,8090
212	16,0856	27,8946
300	10,9717	38,8664
425	7,9249	46,7913
500	5,1310	51,9223
710	6,8732	58,7955
1000	12,1127	70,9082
1180	3,8768	74,7850
1400	6,0112	80,7962
1700	5,5726	86,3688
2360	5,4461	91,8149
2800	2,1175	93,9324
4760	4,0859	98,0183
9520	1,9817	100,0000

APÊNDICE B

Respostas experimentais – completo

Tabela B.1 – Respostas experimentais para todas os experimentos realizados – em triplicata

Experimento	Variáveis			Respostas		
	x_1	x_2	x_3	Umidade (%)	$\eta(\%)$	$d_{50}(\mu\text{m})$
1	-1	-1	-1	23,69	79,43	129,30
2	-1	-1	-1	21,84	75,70	202,25
3	-1	-1	-1	21,39	82,37	171,82
4	-1	-1	0	19,46	80,63	170,40
5	-1	-1	0	21,85	78,20	186,01
6	-1	-1	0	21,69	80,75	179,43
7	-1	-1	+1	17,32	79,23	154,47
8	-1	-1	+1	18,70	81,67	148,89
9	-1	-1	+1	19,87	77,83	157,06
10	-1	0	-1	17,14	74,50	163,16
11	-1	0	-1	18,69	78,75	149,20
12	-1	0	-1	18,64	79,00	137,61
13	-1	0	0	17,76	78,14	130,00
14	-1	0	0	18,73	75,27	143,28
15	-1	0	0	18,48	76,52	130,00
16	-1	0	+1	18,35	74,32	130,00
17	-1	0	+1	18,35	76,47	119,25
18	-1	0	+1	18,75	79,78	106,48
19	-1	+1	-1	18,38	72,40	184,19
20	-1	+1	-1	18,96	75,57	154,82
21	-1	+1	-1	18,57	79,06	149,70
22	-1	+1	0	18,22	76,39	127,43
23	-1	+1	0	18,15	77,19	130,00
24	-1	+1	0	18,46	76,15	128,20

Tabela B.1 – (continuação)

Experimento	Variáveis			Respostas		
	x_1	x_2	x_3	Umidade (%)	$\eta(%)$	$d_{50}(\mu m)$
25	-1	+1	+1	19,57	80,60	106,00
26	-1	+1	+1	18,72	77,23	115,22
27	-1	+1	+1	19,52	75,39	123,17
28	0	-1	-1	20,52	86,47	101,21
29	0	-1	-1	22,87	85,66	127,56
30	0	-1	-1	21,21	87,19	136,38
31	0	-1	0	20,88	82,69	121,85
32	0	-1	0	20,83	85,93	126,32
33	0	-1	0	21,91	85,81	137,85
34	0	-1	+1	23,19	83,85	105,99
35	0	-1	+1	22,56	86,81	95,92
36	0	-1	+1	21,76	86,34	94,99
37	0	0	-1	19,14	88,04	93,48
38	0	0	-1	19,24	82,58	119,43
39	0	0	-1	20,82	86,76	117,11
40	0	0	0	19,23	83,90	94,31
41	0	0	0	20,45	81,48	105,52
42	0	0	0	21,15	91,35	94,05
43	0	0	+1	21,55	82,94	92,79
44	0	0	+1	21,66	80,22	91,46
45	0	0	+1	20,35	86,74	100,54
46	0	+1	-1	19,28	79,33	119,67
47	0	+1	-1	18,14	79,55	120,38
48	0	+1	-1	18,76	81,87	105,99
49	0	+1	0	21,07	78,61	125,13
50	0	+1	0	19,57	78,22	118,64
51	0	+1	0	21,05	76,50	120,34
52	0	+1	+1	20,61	78,38	106,00
53	0	+1	+1	21,34	79,03	121,22
54	0	+1	+1	21,14	77,72	95,73

Tabela B.1 – (continuação)

Experimento	Variáveis			Respostas		
	x_1	x_2	x_3	Umidade (%)	$\eta(%)$	$d_{50}(\mu m)$
55	+1	-1	-1	23,77	84,74	106,00
56	+1	-1	-1	22,95	78,85	102,35
57	+1	-1	-1	21,02	84,03	100,51
58	+1	-1	0	21,62	86,23	104,61
59	+1	-1	0	22,38	82,50	105,99
60	+1	-1	0	21,50	80,71	101,71
61	+1	-1	+1	20,29	83,75	101,06
62	+1	-1	+1	20,79	81,41	96,55
63	+1	-1	+1	20,88	83,02	104,80
64	+1	0	-1	18,28	84,01	93,63
65	+1	0	-1	18,91	83,24	93,22
66	+1	0	-1	19,35	86,00	93,46
67	+1	0	0	18,44	83,72	93,50
68	+1	0	0	19,32	82,25	92,19
69	+1	0	0	18,88	83,86	87,47
70	+1	0	+1	18,94	78,80	87,50
71	+1	0	+1	19,90	79,84	90,42
72	+1	0	+1	20,16	83,55	93,60
73	+1	+1	-1	17,06	85,87	92,79
74	+1	+1	-1	17,06	84,57	92,86
75	+1	+1	-1	17,74	80,91	92,74
76	+1	+1	0	18,43	78,53	86,61
77	+1	+1	0	18,70	81,05	93,31
78	+1	+1	0	19,05	77,00	85,15
79	+1	+1	+1	20,05	75,34	80,21
80	+1	+1	+1	21,26	80,89	90,41
81	+1	+1	+1	20,11	78,10	84,47

APÊNDICE C

Gráficos de resíduos gerados pelas regressões

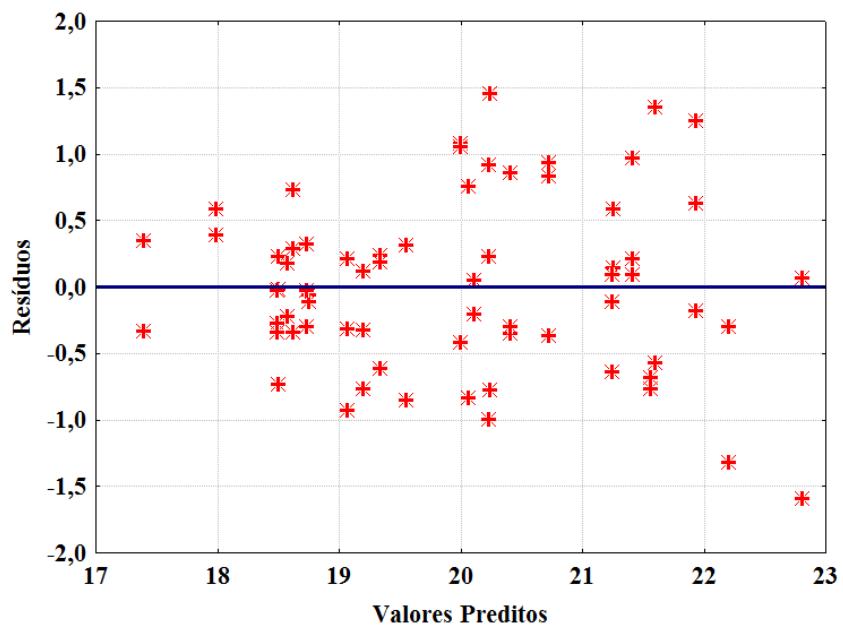


Figura C.1 – Distribuição dos resíduos para o teor de umidade do material retido após a eliminação de 11 experimentos

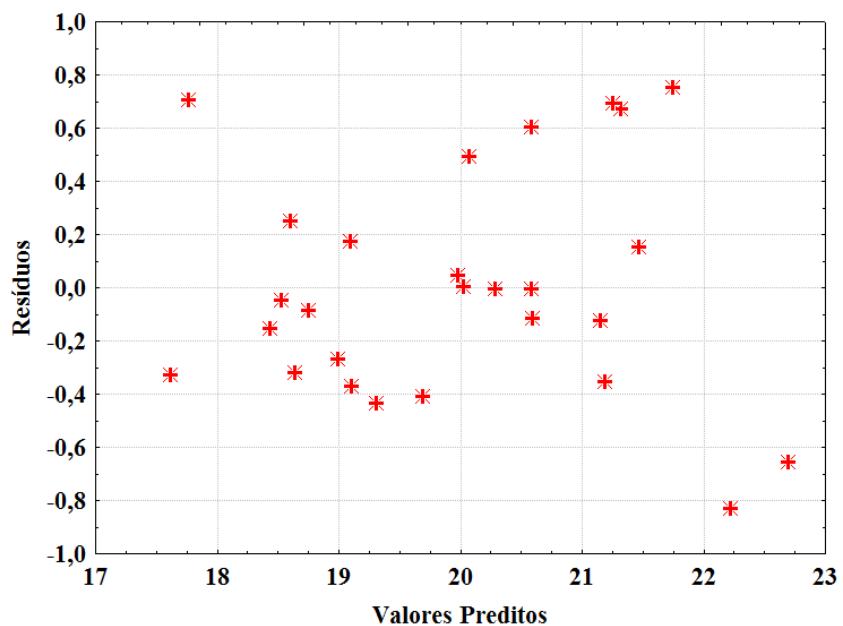


Figura C.2 – Distribuição dos resíduos para o teor de umidade da regressão com os valores médios da resposta

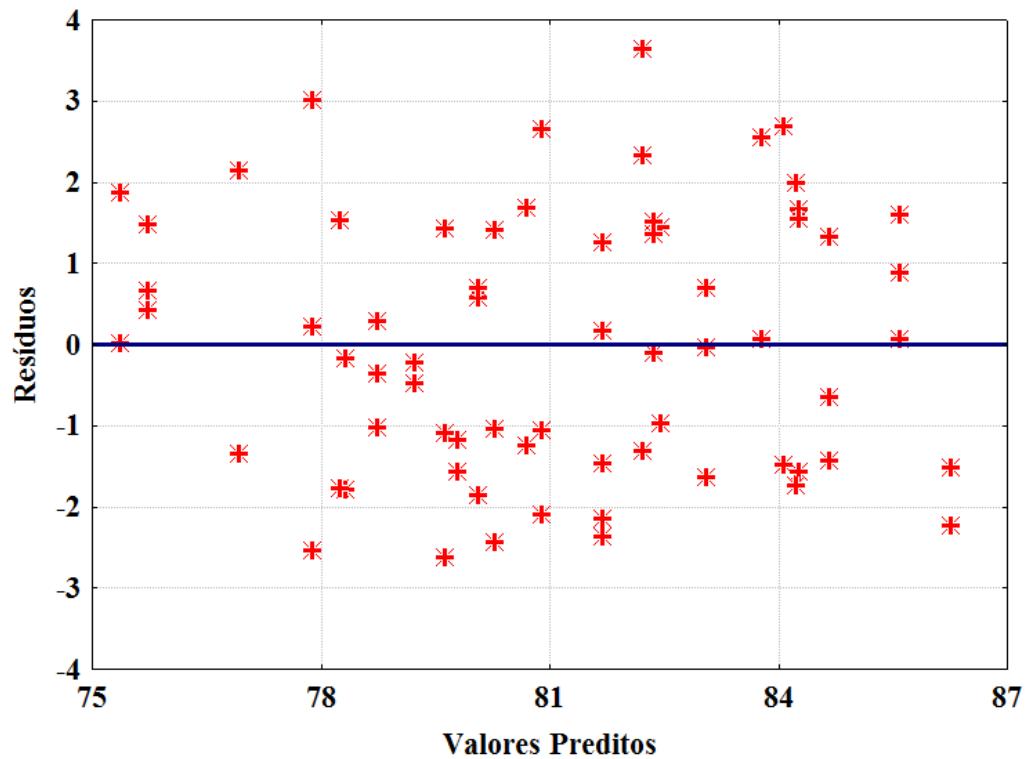


Figura C.3 – Distribuição dos resíduos para a eficiência granulométrica após a eliminação de 13 experimentos

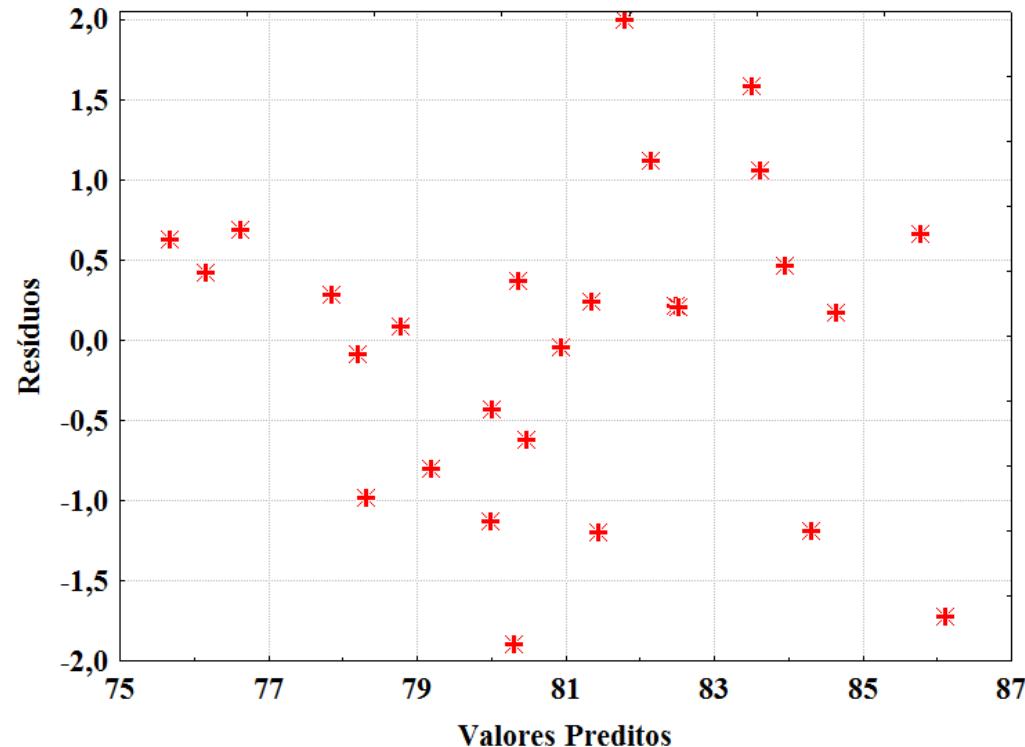


Figura C.4 – Distribuição dos resíduos para a eficiência granulométrica com os valores médios da resposta

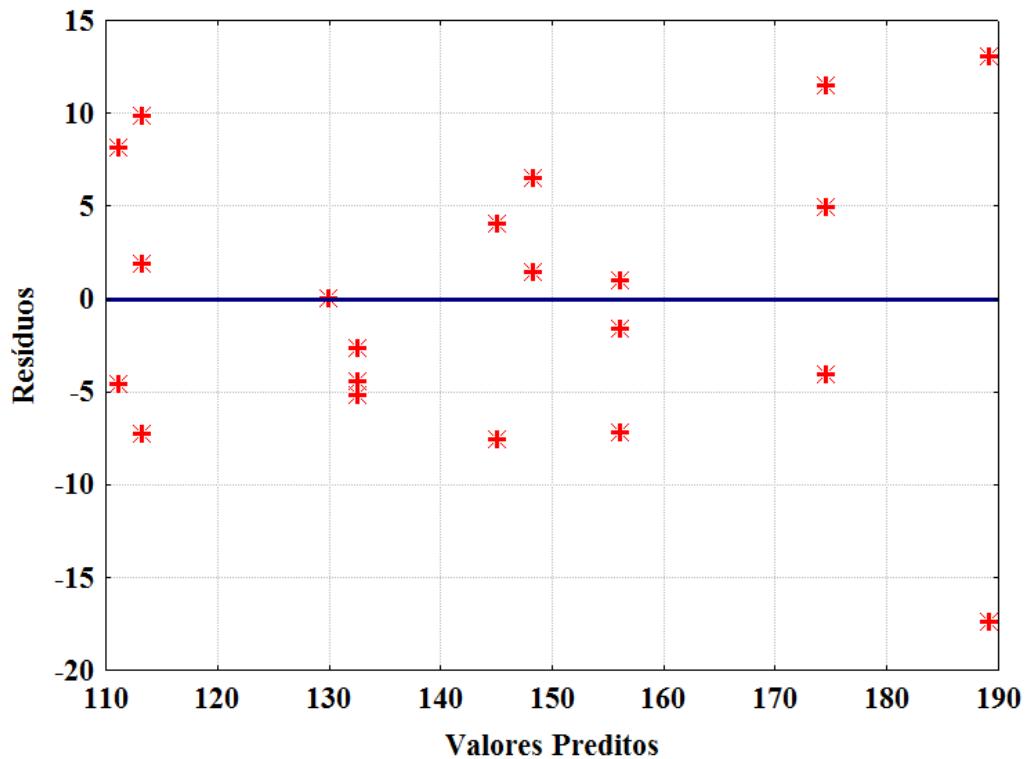


Figura C.5 – Distribuição dos resíduos para o diâmetro de corte da tela de 125 *mesh* após a eliminação de 5 experimentos

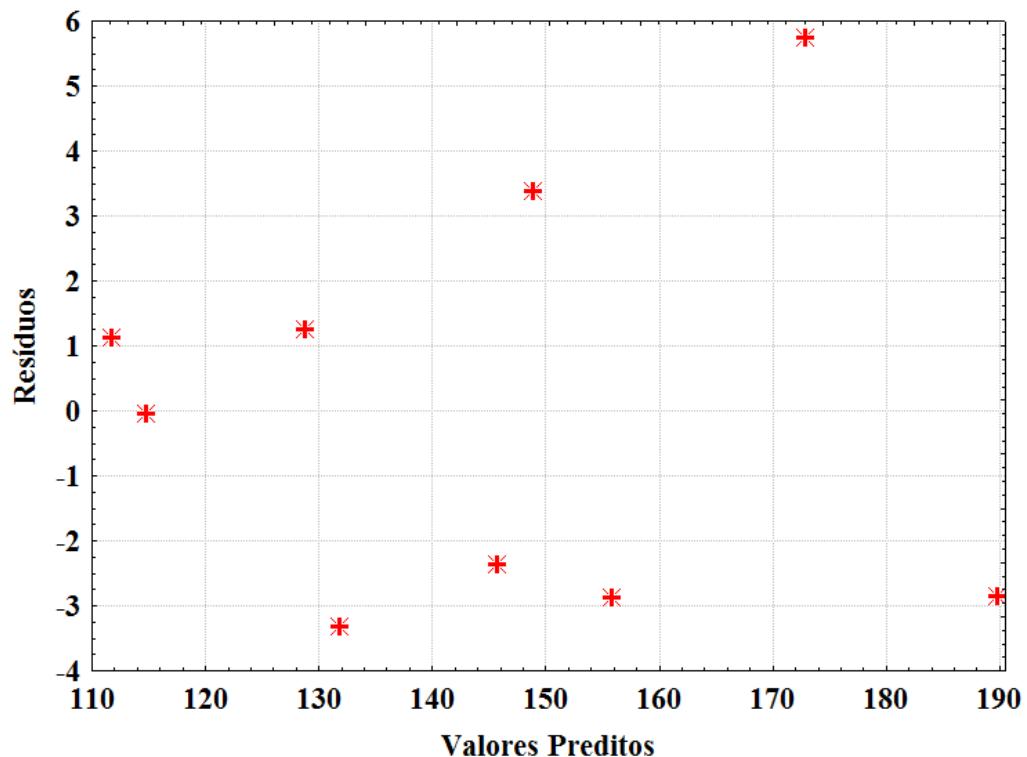


Figura C.6 – Distribuição dos resíduos para o diâmetro de corte da tela de 125 *mesh* com os valores médios da resposta

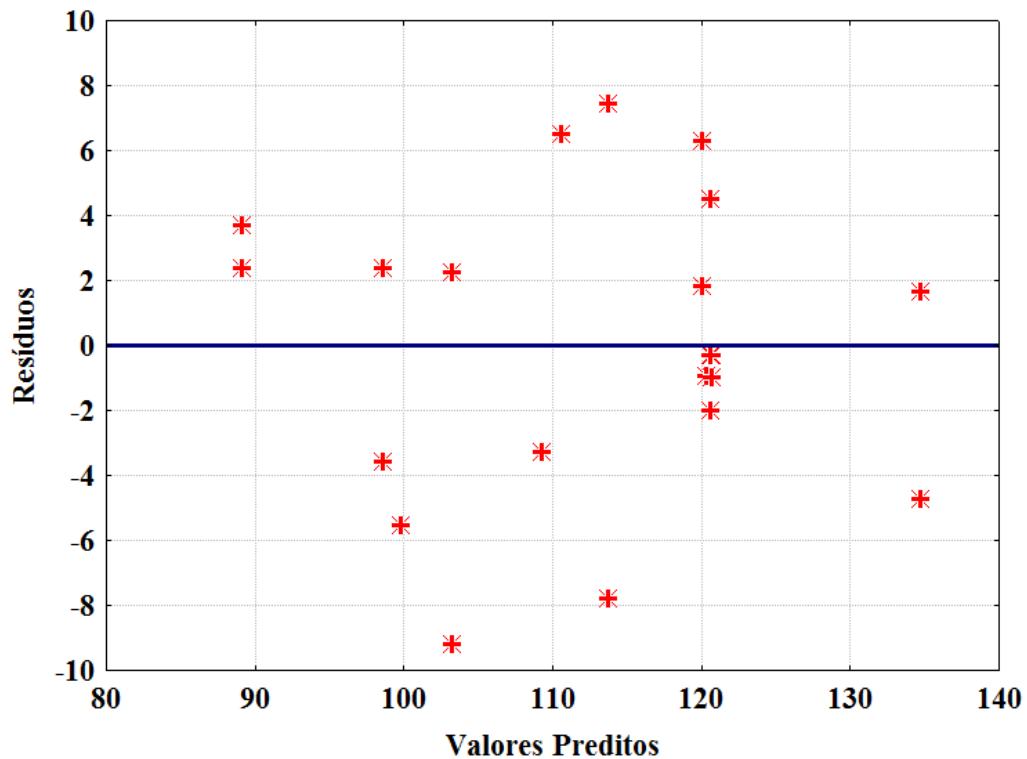


Figura C.7 – Distribuição dos resíduos para o diâmetro de corte da tela de 150 *mesh* após a eliminação de 6 experimentos

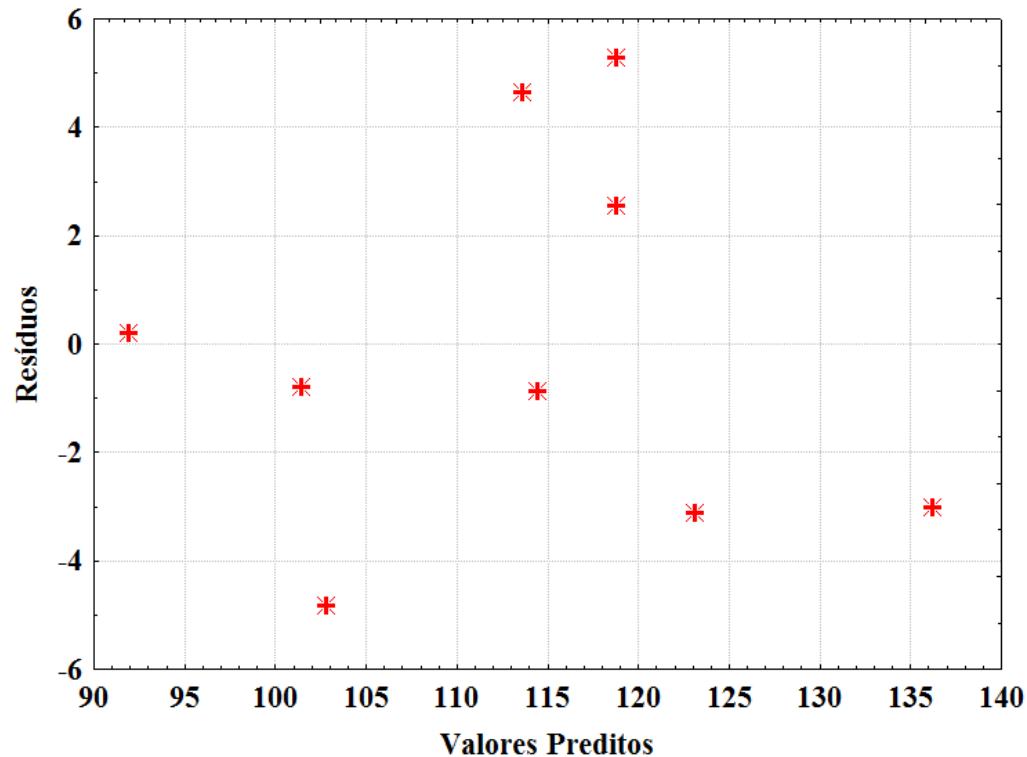


Figura C.8 – Distribuição dos resíduos para o diâmetro de corte da tela de 150 *mesh* com os valores médios da resposta

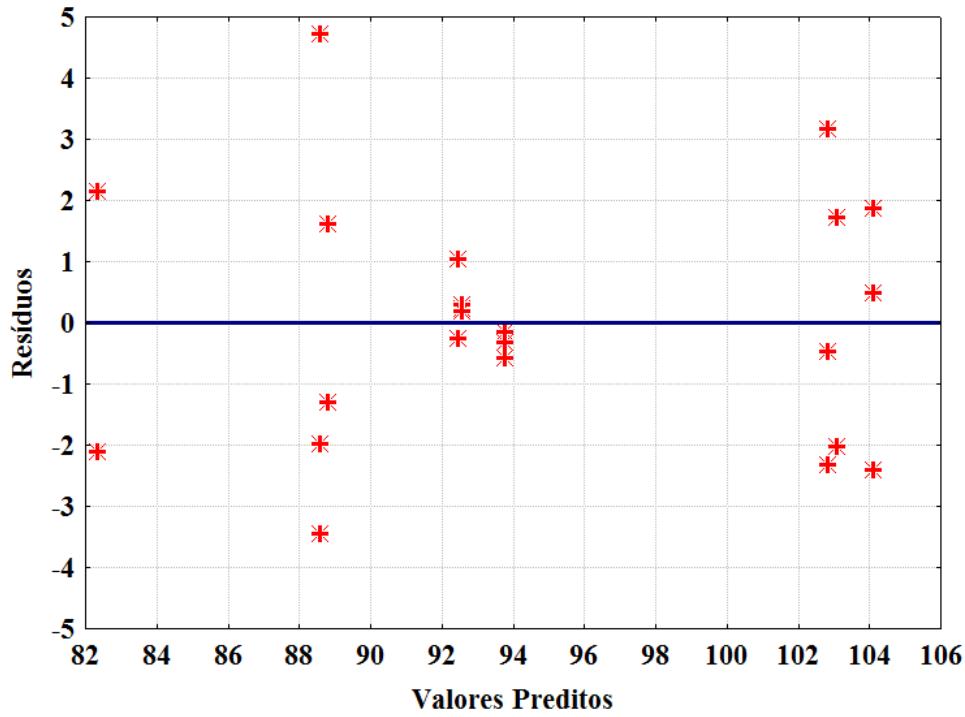


Figura C.9 – Distribuição dos resíduos para o diâmetro de corte da tela de 175 *mesh* após a eliminação de 4 experimentos

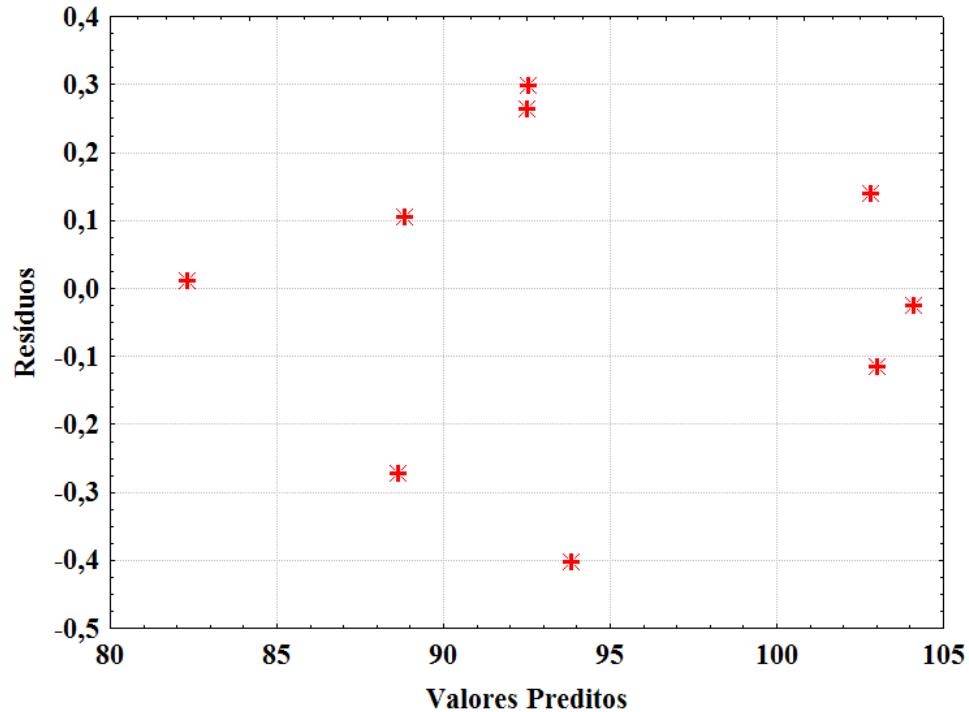


Figura C.10 – Distribuição dos resíduos para o diâmetro de corte da tela de 175 *mesh* com os valores médios da resposta

Pelos gráficos de resíduos das regressões realizadas neste trabalho, nota-se que estes possuem distribuição aleatória, indicando que são independentemente distribuídos.