



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO PENEIRAMENTO VIBRATÓRIO OPERANDO
COM REDUÇÃO DE PRESSÃO NA REGIÃO DE SECAGEM DA TELA**

ANDERSON LIMA DE MENEZES

Uberlândia – MG

2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE PENEIRAMENTO VIBRATÓRIO OPERANDO
COM REDUÇÃO DE PRESSÃO NA REGIÃO DE SECAGEM DA TELA**

Autor: Anderson Lima de Menezes

Orientador: Ricardo Amâncio Malagoni

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

Uberlândia - MG

2018

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

M543c Menezes, Anderson Lima de, 1989-
2018 Contribuição ao estudo de peneiramento vibratório operando com
redução de pressão na região de secagem da tela / Anderson Lima de
Menezes. - 2018.
106 f. : il.

Orientador: Ricardo Amâncio Malagoni.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.
Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.271>
Inclui bibliografia.

1. Engenharia química - Teses. 2. Poços de petróleo - Fluidos de
perfuração - Teses. 3. Poços de petróleo - Perfuração - Teses. I.
Malagoni, Ricardo Amâncio, 1980- II. Universidade Federal de
Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. III.
Título.

CDU: 66.0

Maria Salete de Freitas Pinheiro – CRB6/1262

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA, EM 20/02/2018.

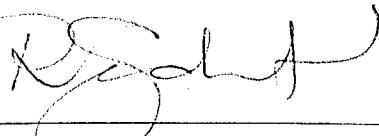
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Ricardo Amâncio Malagoni
Orientador (PPGEQ/UFU)



Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde
(PPGEQ/UFU)



Prof. Dr. Rubens Gedraite
(PPGEQ/UFU)

Participou por videoconferência

Prof. Dr. Wânderson de Oliveira Assis
(CEUN-IMT)

*A minha mãe, Maria do Carmo, a minha irmã,
Andréa e a minha querida esposa, Angélica.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me dado força para chegar até esse momento, por minhas conquistas e por minha família.

A minha mãe, Maria do Carmo Meneses Lima, por todo exemplo de caráter, carinho, amor e compreensão. A minha irmã, Andréa Lima Menezes, pelo carinho e torcida.

A minha esposa, Angélica Tavares Santos de Menezes, pelo amor, paciência, incentivo e ajuda.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ricardo Amâncio Malagoni, pela parceria, compreensão, ajuda e constantes ensinamentos.

Ao Prof. Dr. Rubens Gedraite, pela amizade, confiança e ajuda na solução dos problemas que surgiram ao longo da realização deste trabalho. Agradeço também ao Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde, pela amizade, ajuda e apoio.

Ao amigo Vinicius Pimenta Barbosa pela amizade, parceria e constante ajuda na realização dos experimentos deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Adilson José de Assis, pelos ensinamentos, amizade, apoio e ajuda durante essa jornada. Agradeço também ao Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Barrozo, pela ajuda, ensinamentos e amizade.

Aos amigos da Unidade de Pesquisa da Engenharia Química (UPEQ) no bairro Segismundo Pereira, pelas conversas, trocas de experiência e ajuda.

Aos meus colegas de turma, pela amizade com todos, conversas, momentos de estudos e lazer, em especial ao grupo “Mestrado Fit”.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, seus docentes e técnicos, em especial Ulysses, por acreditarem e incentivarem o meu desenvolvimento, pela oportunidade de realização deste trabalho, pela estrutura do laboratório, base teórica e ajuda.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a PETROBRÁS pelo suporte financeiro.

Por fim, agradeço a todos professores, familiares, amigos e colegas que participaram da minha vida e contribuíram, direta ou indiretamente, na realização deste trabalho.

O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence os obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis”.

José de Alencar

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS -----	i
LISTA DE TABELAS -----	iii
RESUMO -----	iv
ABSTRACT -----	v
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO -----	1
1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO -----	1
1.2 OBJETIVOS -----	2
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA -----	4
2.1 BREVE HISTÓRICO DO PETRÓLEO -----	4
2.1.1 NO MUNDO -----	4
2.1.2 NO BRASIL -----	6
2.2 PERFURAÇÃO DE POÇO DE PETRÓLEO-----	8
2.2.1 MÉTODOS DE PERFURAÇÃO-----	9
2.3 FLUIDOS DE PERFURAÇÃO-----	11
2.3.1 CARACTERÍSTICAS -----	12
2.3.2 FUNÇÕES DOS FLUIDOS DE PERFURAÇÃO -----	13
2.3.3 PROPRIEDADES DO FLUIDO DE PERFURAÇÃO-----	15
2.3.4 TIPOS DE FLUIDO DE PERFURAÇÃO -----	17
2.4 UNIDADE DE CONTROLE DE SÓLIDOS PARA RECUPERAÇÃO DO FLUIDO PÓS-PERFURAÇÃO-----	20
2.5 PENEIRAMENTO VIBRATÓRIO -----	23
2.5.1 CARACTERÍSTICAS DO PENEIRAMENTO -----	24
2.5.2 INCLINAÇÃO DA TELA -----	25
2.5.3 MOVIMENTOS -----	26
2.5.4 DESEMPENHO DO PENEIRAMENTO VIBRATÓRIO-----	29
2.5.5 VARIÁVEIS OPERACIONAIS-----	33
2.5.6 OPERAÇÃO SOB VÁCUO -----	35

CAPÍTULO 3 - MATERIAL E MÉTODOS-----	37
3.1 UNIDADE EXPERIMENTAL -----	37
3.1.1 PENEIRA VIBRATÓRIA-----	39
3.1.2 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO-----	40
3.1.3 SISTEMA DE COLETA DO RETIDO E DO PASSANTE-----	41
3.1.4 SISTEMA DE CONTROLE DA FORÇA-G-----	41
3.1.5 SISTEMA DE APLICAÇÃO DO VÁCUO -----	43
3.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL -----	44
3.3 RESPOSTAS AVALIADAS -----	46
3.3.1 TEOR DE UMIDADE RESIDUAL -----	46
3.3.2 PORCENTAGEM DE SÓLIDOS RETIDOS -----	47
3.3.3 PORCENTAGEM DE ÁREA OCUPADA PELO LÍQUIDO (PORCENTAGEM DE ÁREA MOLHADA)-----	48
3.3.4 PONTO ÓTIMO DE OPERAÇÃO DO PENEIRAMENTO VIBRATÓRIO SOB VÁCUO -----	49
3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS -----	50
3.4.1 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMETRICA DOS SÓLIDOS UTILIZADOS -----	50
3.4.2 DENSIDADE REAL DOS SÓLIDOS UTILIZADOS -----	50
3.4.3 VISCOSIDADE DINÂMICA DO FLUIDO UTILIZADO -----	51
3.5 METODOLOGIA EXPERIMENTAL -----	51
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO-----	54
4.1 CONDIÇÃO A (PENEIRAMENTO SEM VÁCUO) -----	55
4.1.1 TEOR DE UMIDADE RESIDUAL (SEM VÁCUO)-----	55
4.1.2 PORCENTAGEM DE SÓLIDOS RETIDOS (SEM VÁCUO)-----	58
4.2 CONDIÇÃO B (PENEIRAMENTO COM VÁCUO) -----	61
4.2.1 TEOR DE UMIDADE RESIDUAL (COM VÁCUO) -----	62
4.2.2 PORCENTAGEM DE SÓLIDOS RETIDOS (COM VÁCUO) -----	65
4.2.3 PORCENTAGEM DE ÁREA OCUPADA PELO LÍQUIDO -----	67
4.2.4 PONTO ÓTIMO DE OPERAÇÃO -----	71
4.3 COMPARAÇÃO ENTRE AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS ESTUDADAS -----	71
4.3.1 TEOR DE UMIDADE RESIDUAL -----	72
4.3.2 PORCENTAGEM DE SÓLIDOS RETIDOS -----	73

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO E SUGESTÕES-----	76
5.1 CONCLUSÃO-----	76
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS-----	77
REFERÊNCIAS -----	79
APÊNDICE A -----	83
APÊNDICE B -----	88
APÊNDICE C -----	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Método percussivo	9
Figura 2.2: Método rotativo.....	10
Figura 2.3: Perfuração pelo método rotativo.....	11
Figura 2.4: Fluido de perfuração	12
Figura 2.5: Unidade de tratamento de sólidos	22
Figura 2.6: Faixa granulométrica dos equipamentos da unidade de tratamento de sólidos	22
Figura 2.7: Peneira de uma unidade de controle de sólidos	24
Figura 2.8: Peneira vibratória.....	25
Figura 2.9: Configurações da tela da peneira vibratória	26
Figura 2.10: Padrões típicos de movimentos da peneira vibratória	27
Figura 2.11: Tipos de movimentos vibratórios	28
Figura 2.13: Esquema da peneira para realização do balanço de massa.	31
Figura 3.1: Unidade experimental.	37
Figura 3.2: Sistema de aplicação de vácuo.....	38
Figura 3.3: Peneira vibratória.....	39
Figura 3.4: Motovibradores.....	40
Figura 3.5: Macaco manivela.	40
Figura 3.6: Sistema de alimentação.....	40
Figura 3.7: Coriolis.....	40
Figura 3.8: Sistema de coleta dos sólidos retidos e do fluido passante.....	41
Figura 3.9: Acelerômetro 1D.....	42
Figura 3.10: Placa de aquisição de dados.....	42
Figura 3.11: Inversor de frequência.....	42
Figura 3.12: Painel frontal da operação desenvolvido no LabView.	42
Figura 3.13: Diagrama de bloco da operação desenvolvido no LabView.....	43
Figura 3.14: Sistema de aplicação do vácuo.	43
Figura 3.15: Sistema ligado as variáveis	44
Figura 3.16: Interface do software ImageJ. a) seleção da área ocupada pelo líquido; b) seleção da área total de peneiramento.	48
Figura 3.17: Peneiras da série <i>Mesh/Tyler</i>	50

Figura 3.18: Reômetro Brookfield.	51
Figura 4.1: Superfície de resposta para o teor de umidade residual (sem vácuo).	58
Figura 4.2: Superfície de resposta para a porcentagem de sólidos retidos (sem vácuo).	61
Figura 4.3: Superfície de resposta para o teor de umidade residual (com vácuo).	64
Figura 4.4: Superfície de resposta para a porcentagem de sólidos retidos (com vácuo).	67
Figura 4.5: Superfície de resposta para a porcentagem de área ocupada pelo líquido (com vácuo).	70
Figura 4.6: Resultados dos peneiramentos para o teor de umidade residual.	72
Figura 4.7: Resultados dos peneiramentos para a porcentagem de sólidos retidos.	74
Figura B.1: Distribuição dos resíduos para o teor de umidade residual (sem vácuo).	88
Figura B.2: Distribuição dos resíduos para a porcentagem de sólidos retidos (sem vácuo). ..	88
Figura B.3: Distribuição dos resíduos para o teor de umidade residual (com vácuo).	89
Figura B.4: Distribuição dos resíduos para a porcentagem de sólidos retidos (com vácuo). ..	89
Figura B.5: Distribuição dos resíduos para a porcentagem de área ocupada pelo líquido (com vácuo).	90
Figura C.1: Programa para determinar o ponto ótimo operacional.	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Equipamentos/Instrumentos da unidade experimental	38
Tabela 3.2: Equipamentos/Instrumentos do sistema de aplicação de vácuo.	39
Tabela 3.3: Planejamento fatorial utilizado neste trabalho.....	45
Tabela 3.4: Níveis codificados do planejamento.....	46
Tabela 4.1: Viscosidade dinâmica da suspensão nos experimentos sem vácuo.	55
Tabela 4.2: Resultados experimentais para o teor de umidade residual sem vácuo.	56
Tabela 4.3: Resultados experimentais para a porcentagem de sólidos retidos sem vácuo.	59
Tabela 4.4: Viscosidade dinâmica da suspensão nos experimentos com vácuo.....	61
Tabela 4.5: Resultados experimentais para o teor de umidade residual com vácuo.	62
Tabela 4.6: Resultados experimentais para a porcentagem de sólidos retidos com vácuo.	65
Tabela 4.7: Resultados experimentais para a porcentagem de área ocupada pelo líquido.	68
Tabela A.1: Respostas experimentais do teor de umidade residual em triplicata.	83
Tabela A.2: Respostas experimentais da área molhada em triplicata.....	85

RESUMO

Para o reaproveitamento do fluido de perfuração e atendimento às restrições ambientais, é necessária a separação entre o fluido e o sólido. Na unidade de tratamento de sólidos, a peneira vibratória é o primeiro equipamento, sendo responsável pela eficiência global do sistema, entretanto, diversas variáveis influenciam no desempenho desta. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi desenvolver estudos sobre o teor de umidade residual e da porcentagem de sólidos retidos no peneiramento vibratório quando submetido à aplicação de vácuo em resposta as variações na força-g, inclinação da tela e concentração volumétrica de sólidos na alimentação. Utilizando uma suspensão composta por água, goma xantana, formaldeído (para simular o fluido de perfuração) e areia padronizada (para simular os sólidos). Os experimentos foram executados segundo um planejamento fatorial 3^k para o peneiramento sem e com vácuo e foram realizados em um protótipo experimental de peneira vibratória em escala piloto com tela de 175 *mesh* e vazão de alimentação de $40 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$ de suspensão. Os resultados para o peneiramento sem vácuo indicaram que o mínimo de teor de umidade residual foi alcançado com a força-g de 3,0, inclinação de tela de $1,5^\circ$ e concentração volumétrica de 6,0%; enquanto que a porcentagem de sólidos retidos obteve a condição máxima com a força-g de 3,0, inclinação da tela de 0° e concentração volumétrica de 2,0%. Já o peneiramento com vácuo obteve o menor teor de umidade residual com a força-g de 3,0, inclinação da tela de $3,0^\circ$ e concentração volumétrica de 6,0%; enquanto que a maior porcentagem de sólidos retidos foi alcançado com força-g de 3,0, inclinação da tela de 0° e concentração volumétrica de 2,0% igual ao peneiramento sem vácuo; e ainda foi determinado a porcentagem de área molhada que obteve a menor condição com força-g de 5,0, inclinação da tela de $3,0^\circ$ e concentração volumétrica de 6,0%. O ponto ótimo de operação contemplando o menor teor de umidade residual, a maior porcentagem de sólidos retidos e a menor porcentagem de área molhada foi alcançado com a força-g de 3,0, inclinação da tela de $0,825^\circ$ e concentração volumétrica de 6,0%. Os resultados demonstraram a influência do vácuo na redução do teor de umidade residual dos sólidos retidos para a concentração de 2,0%. Conclui-se que os resultados obtidos demonstraram que as variáveis força-g, inclinação da tela e concentração volumétrica influenciam no teor de umidade residual, na porcentagem de sólidos retidos e na porcentagem de área ocupada pelo líquido (somente no peneiramento sob vácuo). Percebeu-se também a influência do vácuo sobre a secagem dos sólidos. Neste sentido, o estudo das variáveis operacionais deste trabalho é importante para a compreensão do peneiramento vibratório na separação sólido-líquido operando sob vácuo.

Palavras-chave: Peneiramento vibratório via úmida, recuperação do fluido de perfuração, operação sob vácuo;

ABSTRACT

For the reuse of drilling fluid and compliance with environmental constraints, a separation of fluid and solid is required. In the solid treatment unit a vibrating screen is the first equipment, being responsible for the overall efficiency of the system, however several variables influence in its performance. Therefore, the objective of this work was to develop studies on the residual moisture content and the percentage of retained solids in the vibrating screen when subjected to vacuum application in response to variations in g-force, screen inclination and volumetric concentration of solids in the feed. Using a suspension composed by water, xanthan gum, formaldehyde (to simulate the drilling fluid) and standardized sand (to simulate the solids). The experiments were carried out in a 3^k factorial design for non-vacuum and vacuum screening and were performed in an experimental prototype of a pilot scale vibrating screen with 175 mesh screen and feed rate of 40 kg/min of suspension. The results for the non-vacuum sieving indicated that the minimum residual moisture content was reached with a 3.0 g-force, screen slope of 1.5° and volumetric concentration of 6.0%; while the percentage of retained solids obtained the maximum condition with a 3.0 g-force, screen inclination of 0° and volumetric concentration of 2.0%. On the other hand, the vacuum screen obtained the lowest residual moisture content with a 3.0 g-force, screen inclination of 3.0° and a 6% volumetric concentration; while the highest percentage of retained solids was reached with g-force of 3.0, screen slope of 0° and volumetric concentration of 2.0% equal to the screening without vacuum; and it was also determined the percentage of wet area that obtained the lowest condition with g-force of 5.0, screen slope of 3.0° and volumetric concentration of 6.0%. The optimum operating point considering the lowest residual moisture content, the highest percentage of retained solids and the lowest percentage of wet area was achieved with g-force of 3.0, screen slope of 0.825° and volumetric concentration of 6.0%. The results demonstrated the influence of vacuum on reducing the residual moisture content of the solids retained at the 2.0% concentration. It can be concluded that the results obtained in variation of the g-force, screen inclination and volumetric concentration influence the residual moisture content, the percentage of solids retained and the percentage of area occupied by the liquid (vacuum sieving only). The influence of the vacuum on the drying of the solids was also perceived. In this sense, the study of the variables of this work is important for the understanding of the vibrating sieving in solid-liquid separation under vacuum.

Keywords: Wet vibration screening; recovery of drilling fluid; vacuum operation.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Nos primórdios das operações de perfuração de poços, era empregado o método percussivo. Neste método a rocha é triturada por ação do peso da torre aplicado por uma broca. Entretanto, com a globalização e a necessidade da exploração de poços de petróleo cada vez mais profundos, surgiu o método rotativo que é utilizado atualmente. Nesta operação a rocha é fragmentada pelo atrito devido a rotação de uma broca localizada na extremidade da coluna de perfuração gerando os sólidos de perfuração.

Deste modo, na perfuração de poços pelo método rotativo é necessário a utilização do fluido de perfuração. Este fluido é bombeado por dentro da coluna de perfuração até a broca que injeta-o dentro do poço e retorna à superfície pelo espaço anular entre a coluna de perfuração e as paredes do poço carregando os sólidos gerados na perfuração. Nesse processo o fluido desempenha diversas funções essenciais para o sucesso e segurança da perfuração.

A mistura sólido-líquido que retorna à superfície é direcionada para a unidade de tratamento de sólidos, responsável pela recuperação do fluido de perfuração, diminuindo o custo com a reposição de fluido novo no processo, e a adequação dos sólidos às restrições ambientais para o descarte. Esta unidade é composta por diversos equipamentos que promovem a separação, como peneiras vibratórias, hidrociclones e centrífugas decantadoras.

Os equipamentos que compõem cada estágio da unidade de controle de sólidos devem ser projetados para remover eficientemente a faixa granulométrica de sólidos de acordo com a sua capacidade. Como esses equipamentos estão conectados em série, se um dos equipamentos não operar eficientemente, irá sobrecarregar o equipamento seguinte e reduzir a eficiência global da unidade.

1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

O primeiro equipamento da unidade de controle de sólidos é a peneira vibratória, responsável pela remoção dos sólidos com maior espessura. Na operação da peneira vibratória diversas variáveis afetam o desempenho deste equipamento, dentre elas: força-g (razão entre a aceleração do movimento vibratório e a aceleração gravitacional), concentração volumétrica de sólidos, inclinação da tela, vazão de alimentação, abertura da tela, reologia do fluido de

perfuração, entre outras. Essas variáveis devem ser monitoradas e controladas para proporcionar a maior recuperação do fluido de perfuração e obter sólidos com o menor teor de umidade residual devido a legislação ambiental.

Para promover a adequação dos sólidos de perfuração à legislação ambiental vigente, existem poucos trabalhos na literatura que apresentam alternativas para a separação sólido-líquido e, consequentemente, secagem dos sólidos. Deste modo, existem: o separador rotacional usado para substituir a peneira proposta por Botnmarket *et al.* (2001); o secador de cascalhos por microondas proposto por Pereira (2013) e que obteve resultados melhores em comparação com a centrífuga vertical filtrante para secagem dos cascalhos; o sistema de transporte a vácuo que também é utilizado para substituir a peneira proposta por Larson *et al.* (2013); o separador *screen pulse* (sistema à vácuo) proposto pela Mi Swaco (2017) utilizado na peneira vibratória para promover uma melhor separação entre o fluido de perfuração e os sólidos.

Este trabalho tem a motivação de estudar o peneiramento vibratório operando com aplicação de vácuo para obtenção de sólidos com menor teor de umidade residual que estejam adequados para descarte de acordo com a legislação ambiental vigente ou sólidos menos úmido que possibilitem aumentar a capacidade operacional dos secadores de cascalhos.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver estudos acerca do comportamento do teor de umidade residual e da porcentagem de sólidos retidos no peneiramento em protótipo de peneira vibratória quando submetida à aplicação de vácuo em resposta as variações nas condições operacionais, a saber: (i) - frequência de vibração da peneira, (ii) - inclinação da tela da peneira e (iii) - concentração volumétrica de sólidos na corrente de alimentação;

Desta maneira, os objetivos específicos são: avaliar experimentalmente a influência do vácuo na diminuição do teor de umidade residual do sólidos retidos pela tela da peneira e no aumento da porcentagem de sólidos retidos; obter os modelos semi-empíricos que relacionem as variáveis operacionais estudadas com as respostas (teor de umidade residual dos sólidos retidos e porcentagem de sólidos retidos) no peneiramento convencional (sem aplicação de vácuo) e no peneiramento alternativo (com aplicação de vácuo); obter o modelo semi-empírico que relate as variáveis operacionais estudadas com a porcentagem de área ocupada pelo líquido no peneiramento alternativo (com aplicação de vácuo); e determinar o ponto ótimo da condição operacional no peneiramento vibratório operando sob vácuo, no intervalo estudado,

que proporcione um baixo teor de umidade residual, uma alta porcentagem de sólidos retidos e uma baixa porcentagem de área ocupada pelo líquido.

No Capítulo 2, denominado “Revisão Bibliográfica” foram apresentados um breve histórico do petróleo no mundo e no Brasil; os principais métodos de perfuração de poços de petróleo; os fluidos de perfuração apresentando as características, as funções, as propriedades e os tipos. A unidade de controle de sólidos para recuperação do fluido de perfuração foi reportada neste capítulo. A descrição do peneiramento vibratório apresentando as principais características, os tipos de inclinações da tela, os movimentos vibratórios, o desempenho e as alguma variáveis operacionais (força-g, concentração de sólidos, inclinação da peneira) e a operação sob vácuo foram repostadas no Capítulo 2.

No Capítulo 3, denominado “Material e Métodos” foram apresentados a unidade experimental com os principais componentes que a compõe (peneira vibratória, sistema de alimentação, sistema de coleta do material retido e do passante, sistema de controle da força-g e sistema de aplicação do vácuo), assim como, o planejamento experimental e as respostas avaliadas neste trabalho (teor de umidade residual, porcentagem de sólidos retidos, porcentagem de área ocupada pelo líquido, ponto ótimo de operação do peneiramento vibratório sob vácuo). A caracterização dos materiais utilizados e a metodologia experimental foram reportadas neste capítulo.

No Capítulo 4, denominado “Resultados e Discussão” foram apresentados os resultados do teor de umidade residual dos sólidos retidos e da porcentagem de sólidos retidos nos peneiramentos convencional (sem vácuo) e alternativo (com vácuo), bem como, a porcentagem de área ocupada pelo líquido no peneiramento com vácuo e o ponto ótimo de operação. A comparação entre os dois peneiramentos foi reportada neste capítulo.

A conclusão desta dissertação e as sugestões para trabalhos futuros foram descritas no Capítulo 5.

No Apêndice A foram apresentadas as respostas experimentais para o teor de umidade residual nos dois peneiramentos estudados e para a porcentagem de área ocupada pelo líquido no peneiramento com vácuo.

Os gráficos dos resíduos gerados pelas regressões são apresentados no Apêndice B.

No Apêndice C foi apresentado o *script* do programa para determinação do ponto ótimo de operação.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo foi subdividido em cinco seções. A Seção 2.1 faz um breve histórico da origem das explorações de petróleo no Brasil e no mundo. A Seção 2.2 retrata os métodos de perfuração de poços de petróleo. A Seção 2.3 traz informações a respeito dos fluidos de perfuração (características, funções, propriedades e tipos). A Seção 2.4 descreve a unidade de controle de sólidos para recuperação do fluido de perfuração. E, por último, a Seção 2.5 descreve o peneiramento vibratório, dando ênfase às características, inclinações da tela, movimentos, desempenho do peneiramento, influência de algumas variáveis operacionais e descrições da operação sob vácuo.

2.1 BREVE HISTÓRICO DO PETRÓLEO

2.1.1 NO MUNDO

O conhecimento a respeito do petróleo vem desde a antiguidade. Nesta época, o petróleo era utilizado para diversos propósitos como, por exemplo: no uso medicinal, no sistema de aquecimento das embarcações, na lubrificação de equipamentos e armas, entre outras utilizações. Este era encontrado em poços que possuíam pouca profundidade ou até mesmo nas exsudações da superfície terrestre (MORAIS, 2013).

Thomas (2001) descreve várias utilizações do petróleo na antiguidade: os antigos babilônios usavam o asfalto para o assentamento de tijolos; os egípcios empregavam o petróleo na pavimentação de estradas, para embalsamar os mortos, bem como para construir as pirâmides; os fenícios utilizavam o betume na calefação de embarcações. Há também registro da utilização do petróleo por civilizações antigas do novo mundo (índios pré-colombianos), como também pelos incas e maias para vários fins.

Posteriormente, no final do século XVIII, a extração do petróleo era feita de poços rasos localizados na região Baku, onde atualmente é o Azerbaijão e tinha por finalidade a produção de querosene de iluminação, enquanto na Europa Ocidental, na primeira metade do século XIX, o petróleo ganhou força devido a fabricação de querosene produzido por uma pequena indústria para utilização em lampiões rudimentares (MORAIS, 2013).

Segundo Morais (2013), a busca por fontes mais volumosas de petróleo aumentou no ano de 1850 nos Estados Unidos em consequência da utilização do querosene, combustível que apresentava condições de uso e preço mais favoráveis em comparação com os demais combustíveis utilizados na época. De acordo com Lustosa (2002), em 1854 a indústria do petróleo deu início as primeiras pesquisas objetivando a busca pelo petróleo, além disso nesse ano surgiu a primeira companhia petrolífera (*Pennsylvania Rock Oil Company of New York*).

Thomas (2001) e Lustosa (2002) afirmaram que a Era do Petróleo iniciou com a exploração comercial liderada pelo Coronel Edwin L. Drake, um dos sócios da companhia petrolífera, ao utilizar tubos de ferro para revestir as paredes internas dos poços que desmoronavam e conseguiu perfurar um poço de 21 metros de profundidade. Na sequência descobriu-se que a destilação do petróleo pelo método de aquecimento, descoberto pelo químico Benjamim H. Siliman, resultaria em produtos que tinham o potencial econômico para substituir o querosene obtido do carvão e o óleo de baleia, produtos estes utilizados para iluminação.

A partir de 1860 surgiram diversas destilarias para a produção de querosene em grande escala e em decorrência da intensa corrida em busca de novas fontes de petróleo resultou em 1860 na produção de 450.000 barris de petróleo, na Pensilvânia. Em 1862 essa produção chegou a 3 milhões de barris (MORAIS, 2013).

Até o fim do século XIX a perfuração dos poços pelo método de percussão teve seu momento áureo e a partir de então o processo rotativo de perfuração começou a ser desenvolvido sendo empregado em 1900 pelo americano Anthony Lucas na perfuração de um poço de 354 metros de profundidade contendo óleo sendo considerado um marco na história do petróleo (THOMAS, 2001).

No final do século XIX, as plantas industriais começaram a produzir os derivados de petróleo para uso doméstico e também para ser utilizados nos navios em substituição ao carvão. Nesse contexto, o diesel passou a ser utilizado como fonte energética, os óleos lubrificantes e outros derivados também começaram a ganhar destaque no mercado consumidor. Entretanto, com o sucesso do motor a combustão interna, que utiliza os derivados do petróleo como combustível (o diesel e a gasolina) motivou outro gigante do século XX: as empresas petrolíferas (LUSTOSA, 2002).

De acordo com Lustosa (2002), a utilização dos combustíveis derivados do petróleo ganharam grandes proporções, seja na indústria ou na geração de energia elétrica, seja para transporte nos navios, automóveis, aviões e locomotivas. Foram, portanto, desenvolvidas várias

tecnologias que usam os derivados do petróleo como fonte de energia e a economia passou a ficar dependente destes combustíveis.

A produção de petróleo e o aprendizado tecnológico sobre o produto foram liderados pelos Estados Unidos e, consequentemente, desenvolveram muitos dos fundamentos científicos imprescindíveis para aumentar a exploração e aperfeiçoar os produtos derivados do petróleo, graças aos enormes mercados interno e mundiais abertos com a indústria do petróleo (MORAIS, 2013).

Historicamente, a exploração do petróleo e produção dos seus derivados avançou em grande escala, e tornou um importante fator para o crescimento mundial, no que diz respeito ao avanço tecnológico, devido a necessidade de novas tecnologias para a exploração, produção e descobertas de novas fontes de petróleo. Porém, juntamente com o desenvolvimento tecnológico ocorreram crises em decorrência dos picos de alta do preço (SCHIAVI; HOFFMANN, 2015).

2.1.2 NO BRASIL

Os relatos da existência de petróleo no Brasil são da segunda metade do século XIX, quando ocorreu a primeira concessão para a procura de petróleo no Brasil, em 1864. Nesta ocasião o Governo Imperial permitiu à Thomas Sargent pesquisar a existência e exploração de petróleo objetivando a fabricação de óleo para iluminação (MORAIS, 2013). A permissão concedeu o direito a exploração de petróleo em áreas do estado da Bahia: comarcas de Camamú e Ilhéus. E, ocasionou a revolta dos proprietários das terras que protestaram contra a concessão (ESPÍNOLA, 2013).

O fazendeiro Eugênio Ferreira de Camargo, em 1892, foi o pioneiro no território brasileiro a perfurar um poço à procura de petróleo em sua propriedade na cidade de Bofete, estado de São Paulo, com profundidade de 488 metros, contudo, o poço resultou em produzir apenas água sulfurosa (SCHIAVI; HOFFMANN, 2015). Entretanto, D’Almeida (2015) relatam que esse poço produzia dois barris por dia, o que equivale a uma produção muito baixa e, portanto, não sendo considerado um poço comercial. Mas de acordo com Thomas (2001), o primeiro poço foi perfurado apenas em 1897 por Eugênio Ferreira de Camargo e produziu 0,5 m³ de óleo.

Em consequência da pesquisa por petróleo em território brasileiro, em 1907 criou-se o Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil (SGMB) que possuía vínculo com o Ministério da Agricultura. Com a Primeira Guerra Mundial, as buscas por petróleo intensificaram tanto no

Brasil quanto no mundo e em decorrência dessa incessante procura, em 1907 o Governo e a iniciativa privada firmaram parceria para criação da Empresa Paulista de Petróleo, pois o Ministério da Agricultura possuía uma sonda (LUSTOSA, 2002).

Nesta época as pesquisas ainda encontravam bastantes dificuldades para encontrar petróleo por causa do baixo conhecimento tecnológico a respeito da exploração do petróleo, associado à elevada extensão do território brasileiro. O SGMB perfurou 63 poços, sem sucesso, nos estados do Pará, Alagoas, Bahia, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul (LUSTOSA, 2012; THOMAS, 2001)

No governo do presidente Getúlio Vargas, em 1938, foi criado o Conselho Nacional do Petróleo (CNP) que tinha a atribuição de definir e executar a política do petróleo, além de controlar e supervisionar a produção, o comércio dos derivados de petróleo e as atividades de pesquisa (MARTINS, 2008; MORAIS, 2013).

Entretanto, apenas em 1939 a primeira jazida de petróleo explorável comercialmente foi descoberta no Brasil no bairro Lobato na cidade de Salvador, sendo perfurado em torno de dezessete poços que rapidamente perderam vazão e acabaram revelando-se não comerciais. Contudo, o mapeamento geológico e a geofísica começavam a apresentar bons resultados na busca de locais para exploração do petróleo. Em 1941, com a realização do detalhamento da geologia de superfície do Recôncavo Baiano, pode-se obter a descoberta do campo de exploração petrolífera de Candeias no estado da Bahia, sendo considerado o primeiro campo comercial de petróleo no Brasil. Em seguida foi descoberto gás no campo de Aratu e, em 1942, foi descoberto petróleo em Itaparica (DIAS; QUAGLINO, 1993; SCHIAVI; HOFFMANN, 2015).

Em 1953, no segundo governo do presidente Getúlio Vargas, foi instituído o monopólio estatal do petróleo com o projeto de lei que permitia a união construir a sociedade por ações Petróleo Brasileiro S. A. (PETROBRAS) instituindo à união o direito na pesquisa e lavra das jazidas de petróleo, na refinaria de petróleo nacional e estrangeiro, no transporte marítimo do petróleo bruto de origem nacional e dos derivados de petróleo produzidos no País e no transporte por oleodutos e gasodutos (THOMAS, 2001; MORAIS, 2013).

A partir da criação da Petrobras foi descoberto petróleo nos estados do Amazonas, Pará, Sergipe, Alagoas, Bahia, Maranhão, Ceará, Rio Grande do Norte, Espírito Santo, São Paulo, Rio de Janeiro, Paraná e Santa Catarina. Nos anos 50 foram descobertos os campos de petróleo de Tabuleiros dos Martins (Alagoas), Taquipe (Bahia) e em Sergipe foi descoberto no mar o campo de Guaricema (THOMAS, 2001).

Segundo Thomas (2001), na década de 70 foi descoberta a província petrolífera da Bacia de Campos (Rio de Janeiro) e no Rio Grande do Norte foi descoberto petróleo na plataforma continental do campo de Ubarana. Na década de 80 ocorreram a constatação de ocorrências de petróleo em Mossoró (Rio Grande do Norte), as descobertas de Marlim e Albacora em águas profundas da Bacia de Campos. E, na década de 90, foram descobertos os campos gigantes de Roncador e Barracuda na Bacia de Campos.

Os primeiros indícios de petróleo na camada pré-sal foram descobertos em Santos no ano de 2005. As análises feitas em poços desta região indicaram volumes recuperáveis entre cinco e oito bilhões de barris de petróleo e gás natural. Graças a essas grandes descobertas e através do avanço da Petrobras ano após ano com suas novas descobertas, o Brasil, em 2006, atingiu a autossuficiência na produção de petróleo (SCHIAVI; HOFFMANN, 2015).

De acordo com Morais (2013), as fases da evolução histórica do petróleo no Brasil são:

- ✓ Primeira fase (1864-1918): Explorações pioneiras por particulares – busca de petróleo para a produção de óleos para iluminação;
- ✓ Segunda fase (1919-1939): Explorações pioneiras pelo Estado – busca de jazidas para comprovar a existência de petróleo no País;
- ✓ Terceira fase (1940-1973): Busca de petróleo para a redução da dependência de importações;
- ✓ Quarta fase (1974-2006): Explorações de petróleo para a obtenção da autossuficiência na produção;
- ✓ Quinta fase (2006-): Era do Pré-sal – explorações para o aumento das reservas de petróleo.

2.2 PERFURAÇÃO DE POÇO DE PETRÓLEO

A perfuração ocorre essencialmente em duas fases: a fase de exploração e a fase de desenvolvimento. As atividades de exploração são as que envolvem a perfuração de um poço para localizar reservas de hidrocarbonetos, bem como suas dimensões e potencial produtivo. A fase de desenvolvimento ocorre uma vez que as reservas de hidrocarbonetos já foram descobertas, delineadas e confirmada à viabilidade comercial (SCHAFFEL, 2002).

2.2.1 MÉTODOS DE PERFURAÇÃO

Os métodos de perfuração existentes são: o método percussivo e o método rotativo. Esses métodos atuam na Trituração das rochas com a finalidade de perfurar o poço, garantindo a sustentação e a vedação do poço perfurado. Em ambos os métodos são gerados os cascalhos de perfuração durante o processo.

O primeiro método a ser utilizado na perfuração de poços foi o método percussivo, também denominado de método a cabo. Esse método consiste em fragmentar a rocha pelo esmagamento da formação devido a golpes sucessivos aplicado por uma ponteira localizada na extremidade de uma haste de aço. Essa haste é suspensa e deixa-se a mesma cair no local desejado, fazendo com que a broca esmague a rocha. Devido a repetição do movimento de içar e soltar a haste faz com que o poço seja aberto. Os cascalhos gerados são retidos do interior do poço por uma ferramenta denominada *bailer*. Este método tem a vantagem de operar com menores custos, entretanto, as desvantagens em apresentar baixas taxas de penetração, a dificuldade na obtenção de amostras e a deficiência no controle de influxo de fluidos para o poço (PEREIRA, 2014). Na Figura 2.1 encontra-se um desenho esquemático do método percussivo.

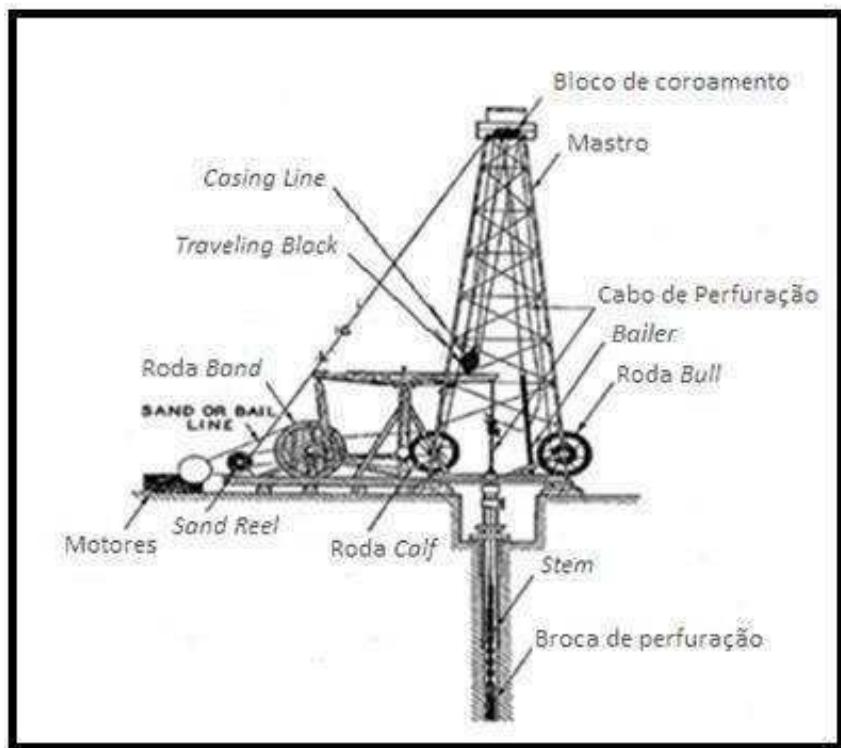


Figura 2.1: Método percussivo (PEREIRA, 2014).

O método de perfuração percussiva é o mais antigo e foi utilizada durante a operação de perfuração do primeiro poço comercial do mundo. Esse poço estava localizado na Pensilvânia (EUA), e foi perfurado em 1859, tendo como responsável Edwin L. Drake (SCHAFFEL, 2002).

Já a perfuração rotativa é o método que as indústrias do petróleo utilizam ultimamente, embora exista o método misto que é a combinação do método rotativo com o percussivo. No método rotativo a perfuração ocorre devido a transmissão da rotação para a broca de perfuração e também pela aplicação do peso da torre sobre a mesma de modo a triturar a rocha e perfurar o poço em direção ao reservatório de petróleo (MELLO, 2014; SCHAFFEL, 2002). Na Figura 2.2 tem-se uma sonda de perfuração que utiliza o método rotativo.

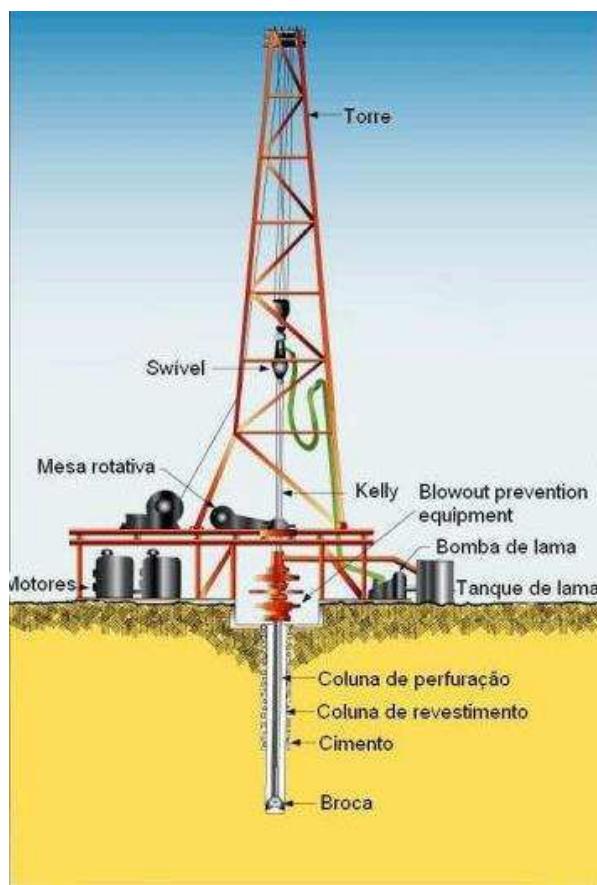


Figura 2.2: Método rotativo (SILVA, 2008).

Neste método, a coluna de perfuração fica apoiada em uma superestrutura, onde se encontra a mesa rotativa que tem a função de sustentar e aplicar um torque à coluna de perfuração, formada por vários tubos, que tem na sua extremidade uma broca de perfuração. Para a realização da perfuração dos poços de petróleo, é injetado o fluido de perfuração pela

coluna de perfuração até a broca que lança esse fluido no poço e ele volta à superfície carregando os sólidos gerados durante a perfuração, pelo espaço anular entre a coluna de perfuração e a parede de poço como demonstrado na Figura 2.3 (SCHAFFEL, 2002).

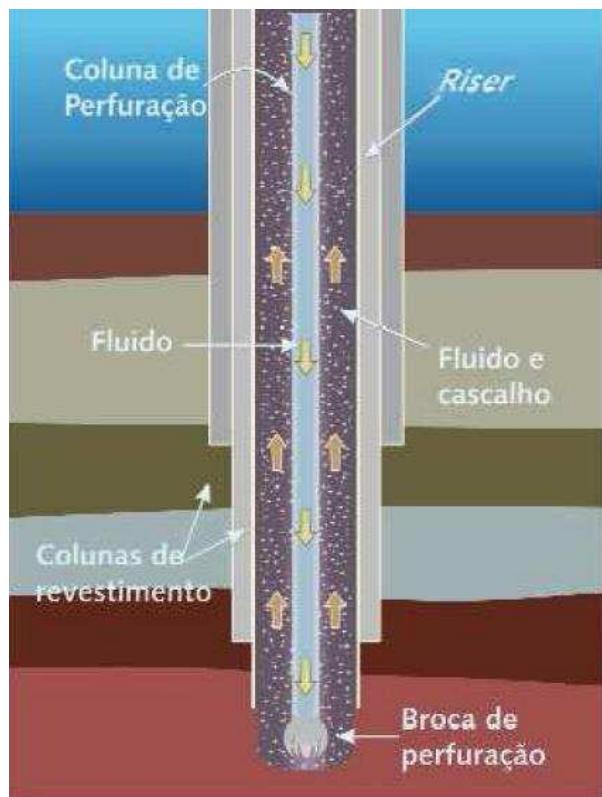


Figura 2.3: Perfuração pelo método rotativo (PEREIRA, 2010).

2.3 FLUIDOS DE PERFURAÇÃO

Os fluidos de perfuração ganharam espaço e importância no cenário mundial a medida que o avanço na exploração dos poços de petróleo exigiu a perfuração de poços mais profundos. Considera-se que, o sucesso da perfuração de um poço, tanto do ponto de vista técnico como do econômico, depende da composição do fluido e dos cuidados e manutenção das suas propriedades durante a perfuração (BALTAR; LUZ, 2003).

Na literatura existem várias definições para o fluido de perfuração. De acordo com o *American Petroleum Institute* (API), o fluido de perfuração é definido como um fluido circulante usado em perfurações rotativas para realizar qualquer ou todas as várias funções necessárias nas operações de perfuração (FINK, 2015). Enquanto para a ASME (2005), o fluido de perfuração é definido como qualquer fluido utilizado na operação de perfuração em que esse fluido possa circular ou ser bombeado da superfície até o fundo poço de perfurado através da

broca e retorne à superfície através do espeço anular. Na Figura 2.4 está apresentado o fluido de perfuração.



Figura 2.4: Fluido de perfuração (BARDSLEY, 2015).

Os fluidos de perfuração são considerados misturas complexas compostas por componentes que podem ser sólidos, líquidos, produtos químicos e, por vezes, até gases. E do ponto de vista químico, dependendo dos componentes presentes no fluido de perfuração, estes podem assumir aspectos de suspensão, emulsão ou dispersão coloidal (THOMAS, 2001). De maneira geral, os fluidos de perfuração podem apresentar em sua composição os seguintes componentes: água, material orgânico, sais dissolvidos e sólidos em suspensão (DARLEY; GRAY, 1988).

2.3.1 CARACTERÍSTICAS

O aumento na demanda da exploração de petróleo envolve a perfuração de reservatórios muito profundos, que possuem geometria complexa, apresentando altas temperaturas e pressões, tornando-se necessário a utilização de um fluido que apresente características relevantes à exploração (TEHRANI *et al.*, 2007).

Neste sentido, Thomas (2001) afirmou que os fluidos de perfuração devem apresentar características que garantam uma perfuração rápida e segura, dentre as quais:

- ✓ ser estável quimicamente;
- ✓ estabilizar mecanicamente e quimicamente as paredes do poço;
- ✓ manter os sólidos em suspensão quando estiver em repouso;
- ✓ ser inerte em relação a danos às rochas produtoras;
- ✓ aceitar qualquer tratamento, físico e químico;
- ✓ ser bombeável;
- ✓ apresentar baixo grau de corrosão e de abrasão em relação à coluna de perfuração e demais equipamentos do sistema de circulação;
- ✓ facilitar as interpretações geológicas do material retirado do poço;
- ✓ apresentar custo compatível com a operação.

Para desempenhar as suas funções fundamentais, os fluidos de perfuração devem possuir várias características desejáveis, o que aumenta consideravelmente a eficiência da operação de perfuração. Estas incluem propriedades reológicas desejadas, prevenção de perda de fluido, estabilidade sob várias condições de operação de temperatura e pressão, estabilidade contra fluidos contaminantes, como água salgada, sulfato de cálcio, cimento, e fluidos contaminados com potássio (FINK, 2015).

2.3.2 FUNÇÕES DOS FLUIDOS DE PERFURAÇÃO

O desenvolvimento das tecnologias de perfurações de poços de petróleo tem incentivado a pesquisa e o aperfeiçoamento dos fluidos de perfuração que desempenham papel fundamental na operação de perfuração do poço, tais como: carrear os fragmentos das rochas perfuradas até a superfície; manter os cascalhos em suspensão durante as paradas de circulação do fluido no poço; resfriar a broca e lubrificar a coluna; estabilizar as pressões nas paredes do poço (FARIAS *et al.*, 2009).

Diversos autores citam as principais funções desenvolvidas pelo fluido durante a perfuração. De acordo com Darley & Gray (1988), o fluido de perfuração desenvolvem as seguintes funções:

- ✓ transportar os detritos gerado pela perfuração da broca até a superfície através do espaço anular do poço;
- ✓ resfriar e limpar a broca;
- ✓ reduzir o atrito entre o colar da coluna de perfuração e as paredes do poço;
- ✓ manter a estabilidade do poço;

- ✓ controlar a pressão do poço para impedir a entrada de fluxos de óleo, gás ou água provenientes das formações rochosas perfuradas;
- ✓ formar uma “torta” de baixa permeabilidade que sele os poros das paredes do poço, prevenindo o escoamento do fluido para o interior das formações;
- ✓ auxiliar na coleta e avaliações de informações sobre os detritos e as formações perfuradas.

Darley & Gray (1988) destacaram algumas restrições e recomendações que devem ser levadas na escolha do fluido de perfuração que são: o fluido de perfuração não deve poluir o meio ambiente e nem gerar risco de contaminação ou ferimento dos operadores; não deve resultar em métodos incomuns ou caros para a conclusão da perfuração do poço; não deve ser danoso à formação rochosa e interferir na produtividade de fluido contido na formação; e, por fim, não deve corroer ou causar desgaste excessivo do equipamento de perfuração.

Já para ASME (2005), as principais funções desenvolvidas pelo fluido de perfuração são:

- ✓ suspender os sólidos perfurados, removendo-os do poço até a superfície;
- ✓ manter o controle da pressão de formação e manutenção da estabilidade do poço;
- ✓ arrefecer, lubrificar e suportar o conjunto de perfuração;
- ✓ vedar formações permeáveis;
- ✓ transmitir energia hidráulica para as ferramentas de perfuração;
- ✓ minimizar danos no reservatório;
- ✓ permitir a avaliação adequada da formação perfurada, fornecendo informações sobre o poço;
- ✓ controlar a corrosão das ferramentas de perfuração;
- ✓ minimizar o impacto no meio ambiente;
- ✓ inibe a formação de hidrato de gás;

Para Thomas (2001), as funções básicas que o fluido de perfuração desenvolve são: transportar os cascalhos gerados pela broca até a superfície limpando o fundo do poço; evitar o influxo exercendo pressão hidrostática sobre a formação rochosa; e resfriar a broca e lubrificar a coluna de perfuração.

2.3.3 PROPRIEDADES DO FLUIDO DE PERFURAÇÃO

Para o sucesso do processo de perfuração é necessário que as propriedades químicas e físicas do fluido de perfuração sejam monitoradas em campo através de testes que garantam a qualidade deste fluido. Na realização destes testes são utilizados equipamentos compactos e de simples manuseio, facilitando o trabalho do operador da sonda e adequando-se às restrições de infraestrutura observadas em uma sonda de perfuração (THOMAS, 2001).

As propriedades físicas mais importantes e frequentemente medidas na sonda são a densidade, os parâmetros reológicos, as forças géis (inicial e final), os parâmetros de filtração e o teor de sólidos. Estas classes de propriedades são mais genéricas e são medidas em qualquer tipo de fluido. Já as propriedades químicas que são determinadas frequentemente nos laboratórios da sonda são o pH, os teores de cloreto e de bentonita e a alcalinidade. Diferentemente das propriedades físicas, as químicas são mais específicas e são determinadas para distinguir os tipos de fluidos. Essas propriedades do fluido que são mais importantes, estão descritas a seguir, segundo Thomas (2001).

Densidade: Os limites de variação de densidade dos fluidos para perfurar uma determinada fase são definidos pela pressão de poros (limite mínimo) e pela pressão de fratura (limite máximo) das formações expostas. Quando se deseja aumentar a densidade do fluido, geralmente adiciona-se a baritina (BaSO_4) que tem densidade de $4,25 \text{ g/cm}^3$, enquanto a densidade dos sólidos de perfuração é em torno de $2,60 \text{ g/cm}^3$. Para reduzir a densidade dos fluidos à base de água, dilui-se com água que apresenta densidade de $1,00 \text{ g/cm}^3$.

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

Forças géis: Alguns fluidos de perfuração são tixotrópicos, isto é, adquirem um estado semirrígido quando estão em repouso e voltam a adquirir um estado de fluidez quando estão novamente em movimento. A força gel é um parâmetro também de natureza reológica que indica o grau de gelificação devido à interação elétrica entre partículas dispersas. A força gel inicial mede a resistência inicial para colocar o fluido em fluxo. Enquanto que a força gel final

mede a resistência do fluido reiniciar o fluxo quando este fica um certo tempo em repouso. A diferença entre elas indica o grau de tixotropia do fluido.

Parâmetros de filtração: A capacidade do fluido de perfuração em formar uma camada de partículas sólidas úmidas, denominada de reboco, sobre as rochas permeáveis expostas pela broca é de fundamental importância para o sucesso da perfuração e da completação do poço. Para formar o reboco, deve haver o influxo da fase líquida do fluido do poço para a formação. 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.

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

Concentração hidrogeniônica (pH): O pH dos fluidos de perfuração é medido através de papeis indicadores ou de potenciômetros, sendo geralmente mantido no intervalo alcalino baixo, isto é, pH entre 7 e 10. O objetivo principal é reduzir a taxa de corrosão dos equipamentos e evitar a dispersão das formações argilosas.

Alcalinidade: A determinação das alcalinidades por métodos diretos de titulação volumétrica de neutralização considera as espécies carbonatos (CO_3^{2-}) e bicarbonatos (HCO_3^-) dissolvidos no fluido, além dos íons hidroxilas (OH^-) dissolvidos e não dissolvidos. Nos testes

de rotina são registrados os seguintes tipos de alcalinidades: alcalinidade parcial do filtrado, alcalinidade da lama e alcalinidade total do filtrado.

Teor de cloretos (salinidade): O teste de salinidade de um fluido é também uma análise volumétrica de precipitação feita por titulação dos íons cloretos. Esta salinidade é expressa em mg/L de cloretos, mg/L de NaCl equivalente ou ppm de NaCl equivalente. Nas determinações em campo, os resultados de salinidade são usados, principalmente, para identificar: o teor de salino na água de preparo do fluido, os influxos de água salgada e a perfuração de uma rocha ou domo salino, bem como controlar a salinidade de fluidos inibidos com sal.

Teor de bentonita (sólidos ativos): O teste do azul de metileno é uma análise volumétrica por adsorção que serve como indicador da quantidade de bentoníticos no fluido de perfuração. Ele mede a capacidade de troca de cátion das argilas e sólidos ativos presentes.

2.3.4 TIPOS DE FLUIDO DE PERFURAÇÃO

Os fluidos de perfuração são classificados em função da sua composição. Embora ocorram divergências, o principal critério para a classificação baseia-se na composição do constituinte principal da fase contínua ou dispersante. Neste contexto, eles podem ser classificados em fluidos de base aquosa (fluidos à base de água), fluidos de base não aquosa (fluidos à base de óleo) e fluidos pneumático (fluidos à base de ar ou de gás). A natureza das fases dispersante e dispersa, os componentes e as quantidades dos constituintes básicos são importantes para definir o tipo de fluido, as características e suas propriedades (THOMAS, 2001; AMOCO, 1994).

De acordo com Baltar e Luz (2003), o componente principal dos fluidos de perfuração, que pode ser água, óleo ou gás, definem a classificação, mas frequentemente dois componentes estão presentes no fluido e em alguns casos até três componentes estão adicionados no fluido de perfuração, e todos contribuem para as propriedades deste fluido.

Fluidos à base de água: A definição de um fluido à base de água considera principalmente a natureza da água e os aditivos químicos empregados no preparo do fluido. A proporção entre os componentes básicos e as interações entre eles provoca sensíveis modificações nas propriedades físicas e químicas do fluido. Consequentemente, a composição é o principal fator a considerar no controle das suas propriedades (THOMAS, 2001).

Ainda segundo Thomas (2001), a água é a fase contínua e o principal componente de qualquer fluido à base de água, podendo ser doce, dura ou salgada. A principal função da água é promover o meio de dispersão para os materiais coloidais. Os fatores a serem considerados na seleção da água de preparo são: disponibilidade, custo de transporte e de tratamento, tipos de formação geológica a serem perfuradas, produtos químicos que comporão o fluido e equipamentos e técnicas a serem usados na avaliação das formações.

Os fluidos à base de água são os fluidos de perfuração mais utilizados devido aos seguintes fatores: baixo custo de manutenção, fácil manipulação e com isso causam menor impacto ambiental ao ser comparado com os fluidos de base não aquosa e podem ser formulados para superar a maioria dos problemas de perfuração. Para compreender melhor a ampla gama de fluidos à base de água, eles são divididos em três subclassificações (AMOCO, 1994):

- Fluidos inibidores: São aqueles que não suprimem significativamente o inchaço de argila. Estes fluidos geralmente são compostos de argilas nativas ou bentonitas comerciais com algum pequeno percentual de soda cáustica ou cal. Podem conter defloculantes e/ou dispersantes, tais como: lignitos, lignossulfonatos ou fosfatos. Os sólidos nativos podem dispersar-se no sistema até que as propriedades reológicas não possam mais ser controladas por diluição da água (AMOCO, 1994). Os fluidos inibidores são programados para perfurar rochas de elevado grau de atividade na presença de água doce (THOMAS, 2001).

- Fluidos não inibidores: São aqueles que retardam consideravelmente a expansão da argila e conseguem a inibição através da presença dos cátions sódio (Na^+), cálcio (Ca^{++}) e potássio (K^+). Normalmente, o potássio ou o cálcio, ou uma combinação dos dois, proporcionam a maior inibição à dispersão de argila. Estes sistemas são geralmente utilizados para perfurar argilas hidratáveis ou areias contendo argilas hidratáveis. Como geralmente a fonte do cátion é um sal, o custo para utilização do fluido inibidor pode ganhar uma parcela importante que é o descarte dos resíduos (AMOCO, 1994). Os fluidos não inibidores são empregados na perfuração de camadas rochosas superficiais, compostas na maioria das vezes de sedimentos inconsolidados (THOMAS, 2001).

- Fluidos poliméricos: São aqueles que dependem de macromoléculas, com ou sem interações com a rocha perfurada para fornecer propriedades de lama, e são muito diversificados em sua aplicação. Estes fluidos podem ser inibidores ou não inibidores dependendo da utilização de um cátion inibidor. Os polímeros podem ser usados para viscosificar os fluidos, controlar as propriedades de filtração, deflocular ou encapsular os sólidos. A estabilidade térmica dos sistemas de poliméricos pode ultrapassar 400°F. Apesar da sua diversidade, os

fluidos de polímeros têm limitações. Os sólidos são uma grande ameaça econômica para execução com sucesso de um sistema de fluido polimérico.

Fluidos à base de óleo: Os fluidos de perfuração são à base de óleo quando a fase contínua ou dispersante é constituída por uma fase óleo, geralmente composta de hidrocarbonetos líquidos. Pequenas gotículas de água ou de solução aquosa constituem a fase descontínua desses fluidos. Alguns sólidos coloidais, de natureza inorgânica e/ou orgânica podem compor a fase dispersa. Os fluidos podem ser emulsões água/óleo propriamente dita (teor de água < 10%) ou emulsão inversa (teor de água de 10% a 45%) (THOMAS, 2001).

Os fluidos à base de óleo podem ser subdivididos em duas classes: os verdadeiros fluidos à base de óleo e as emulsões inversas. Os verdadeiros fluidos à base de óleo contêm água em concentração volumétrica a 5,0 %, asfalto oxidado, ácidos orgânicos, álcalis, agentes de estabilização, óleo diesel ou óleo mineral não tóxico. As emulsões inversas podem conter até 50,0 % em volume de água, que é dispersa em óleo através de um emulsificante especial (LUMMUS E AZAR, 1986).

Nos fluidos de perfuração à base de óleo, tem-se que o óleo é a fase contínua e a água da fase dispersa. O fluido de perfuração a base de óleo contém de 1 a 5% de água emulsionada no sistema com cal e emulsionantes. Esses fluidos são frequentemente divididos em fluidos à base de óleo e fluidos de base sintética (ASME, 2005).

De acordo com Fink (2015), os fluidos à base de óleo possuem óleo como fase contínua, geralmente óleo diesel, óleo mineral ou óleo mineral de baixa toxicidade. Como alguma água estará sempre presente, o fluido à base de óleo deve conter agentes emulsionantes de água. Devido ao caráter de sua fase contínua, estes fluidos oferecem atributos de desempenho inigualáveis em relação à taxa de penetração, a estabilidade do poço, a alta lubricidade, a alta estabilidade térmica e alta tolerância ao sal. No entanto, eles são submetidos a uma rigorosa regulamentação ambiental em relação à seu descarte e reciclagem.

Fluidos à base de ar: Embora os fluidos de perfuração à base de gás possam utilizar o gás natural (metano) ou outros gases de combustão, o ar é o gás mais comum a ser utilizado. O ar usado nesse tipo de fluido produz as chamadas lamas de espuma, nas quais as bolhas de ar são cercadas por uma película de água contendo uma substância estabilizadora de espuma ou material de reforço de película, tal como um polímero orgânico ou bentonita. Este tipo de fluido não é recirculado, sendo frequentemente usado para perfuração de pressão reduzida melhorando a estabilidade do poço. No entanto, o fluido à base de ar possui algumas limitações, uma vez

que a água de perfuração produz formações úmidas e tem uma tolerância de sal limitada (FINK, 2015).

Os fluidos à base de ar/gás (pneumáticos) são utilizados para perfurar áreas esgotadas ou em áreas onde podem ser encontradas formação de baixas pressões. Uma vantagem dos fluídos pneumáticos são as altas taxas de penetração que estes fluidos apresentam. Os fluidos à base de ar/gás são ineficazes em áreas que possuem grandes volumes de fluidos nas formações. Um grande afluxo de fluidos na formação torna necessário a conversão do fluido pneumático para um sistema de fluido à base de líquido. Como resultado, as chances de perder circulação ou danificar uma zona produtiva são aumentadas. Outra consideração ao selecionar fluidos pneumáticos é a profundidade do poço, pois este tipo de fluido não são recomendados para poços que possuam profundidade superior a 10000 pés. Nessa situação, o volume de ar requerido para carrear os sólidos do fundo do poço até a superfície pode tornar-se maior do que a capacidade do equipamento (AMOCO, 1994).

2.4 UNIDADE DE CONTROLE DE SÓLIDOS PARA RECUPERAÇÃO DO FLUIDO PÓS-PERFURAÇÃO

Os cascalhos gerados na perfuração dos poços de petróleo são carreados até a superfície pela ação do fluido de perfuração. Esse processo é caracterizado pela formação de uma mistura (fluido + sólido) que ao chegar a superfície é direcionada para a unidade de controle de sólidos, onde os sólidos devem ser separados para reutilização do fluido de perfuração.

Desta forma, os principais objetivos da unidade de controle de sólidos são a recuperação do fluido de perfuração, que significa a redução global do custo, através da remoção eficiente dos sólidos de perfuração e da minimização da perda de fluidos aderidos a estes; e a adequação dos sólidos provenientes da perfuração na legislação ambiental vigente para posterior descarte reduzindo o impacto ambiental, já que atualmente esta é uma grande preocupação por parte das indústrias petrolíferas (GUERREIRO, 2015).

Segundo ASME (2005), o grande volume de cascalhos no fluido durante a perfuração influencia nas propriedades do fluido e podem causar problemas como: danos ao reservatório, perda de circulação, redução da taxa de perfuração, prisão da coluna, desestabilidade do poço, desgastes dos equipamentos (bombas, broca, entre outros). Visando recuperar o fluido e evitar

estes problemas durante a perfuração, o fluido ao retornar do poço à superfície é enviado para a unidade de controle de sólidos, onde os cascalhos são separados do fluido de perfuração.

O controle de sólidos na plataforma é realizado através de uma série de equipamentos de separação. Dentre os equipamentos mais utilizados na unidade de controle de sólidos estão o sistemas de peneiras vibratórias, hidrociclos e centrífugas. Tratam-se de equipamentos mecânicos que são projetados para separar uma determinada faixa de tamanhos de partículas e são combinados para operar eficientemente em cada projeto de perfuração (MI SWACO, 1998).

O primeiro equipamento da unidade de controle dos sólidos é a peneira vibratória, que recebe o fluido de perfuração ao sair do poço e separa os sólidos mais com maior espessura deste fluido, tais como cascalhos e grãos maiores que areia. Em seguida, o fluido passa por um conjunto de dois a quatro hidrociclos de 8 a 20 polegadas, denominado de desareiadores, que são responsáveis pela retirada da areia presente no fluido. Após os desareiadores, o fluido de perfuração passa pelo dessiltador. Este nome vem do inglês “silt”, que caracteriza uma partícula de tamanho maior que a argila e menor que a areia, denominada “silte”. O dessiltador é formado por um conjunto de oito a doze hidrociclos de 4 a 5 polegadas, cuja função é descartar as partículas de dimensões equivalentes aos de silte (THOMAS, 2001).

De acordo com Thomas (2001), após o dessiltador, o fluido pode ser direcionado para um *mud cleaner*, que é um dessiltador com uma peneira mais eficiente, permitindo a recuperação de partículas, em que parte deste material será reaproveitada e retornará ao fluido reduzindo o custo com aditivos. Algumas sondas também utilizam uma centrífuga para retirar as partículas menores que não tenham sido descartadas pelos hidrociclos. Há ainda na sonda o desgaseificador, permitindo eliminar gás do fluido de perfuração quando há perfuração com gás ou ocorre o influxo de gás da formação para o fluido, de modo a garantir a segurança na recirculação do fluido.

A Figura 2.6 mostra uma unidade de controle de sólidos, composta por peneira vibratória, desareiador, dessiltador, *mud cleaner* e centrífuga.

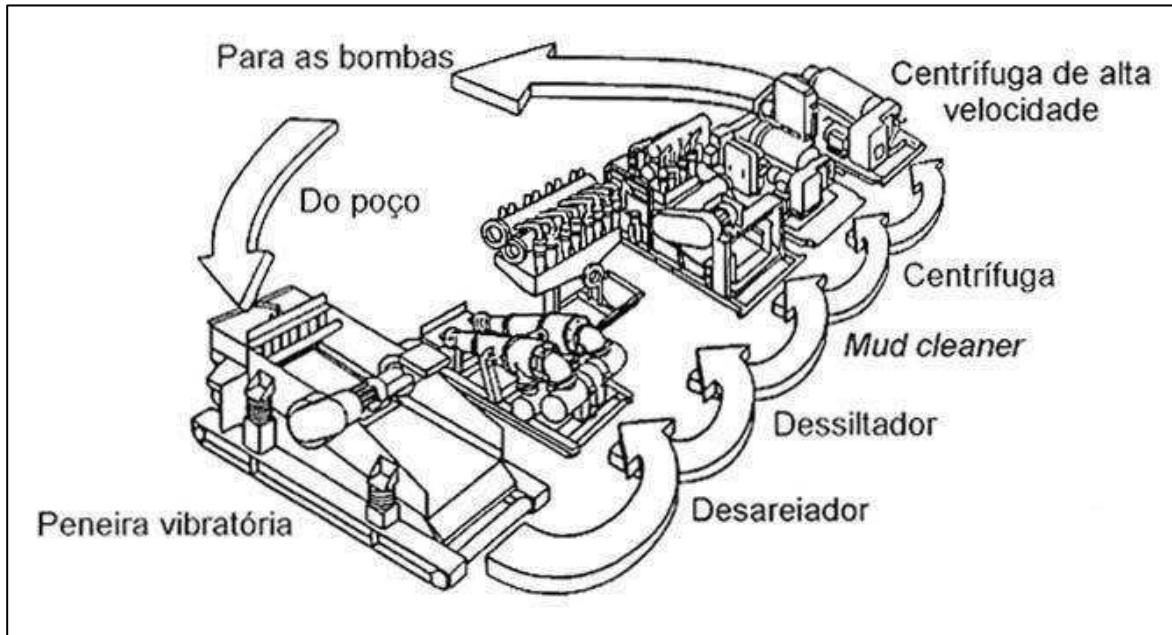


Figura 2.5: Unidade de tratamento de sólidos (THOMAS, 2001).

Os equipamentos que compõem a unidade de tratamento de sólidos são projetados para remover, eficientemente e economicamente, uma fração dos sólidos provenientes da perfuração de acordo com a faixa de tamanho das partículas. Na Figura 2.6 está apresentado a faixa granulométrica de operação de cada equipamento (GUERREIRO, 2015).

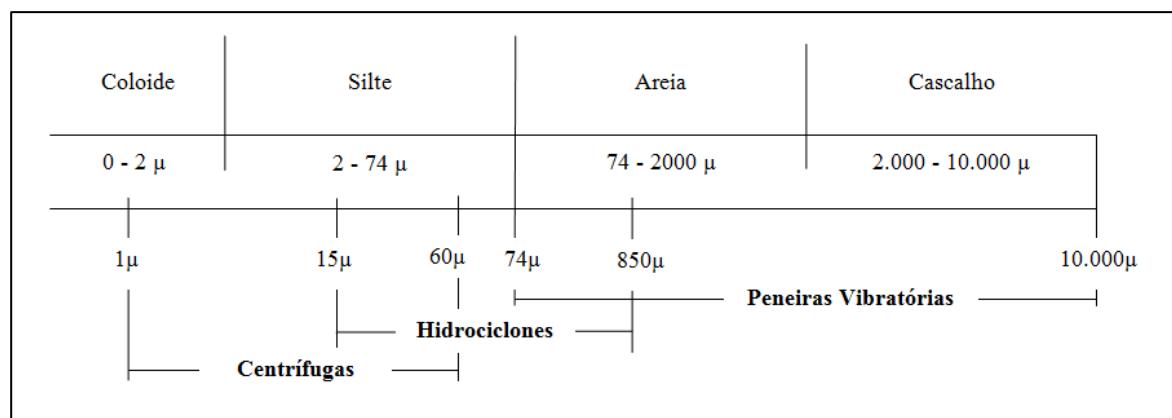


Figura 2.6: Faixa granulométrica dos equipamentos da unidade de tratamento de sólidos (adaptado de MI SWACO, 1998).

Segundo Guerreiro (2015), o bom desempenho desses equipamentos dependem do projeto, instalação, operação e manutenção. É importante notar que cada estágio da unidade de controle de sólidos também possui dependência do ótimo funcionamento do equipamento antecessor, ou seja, para que um dado equipamento possua um excelente funcionamento, o

equipamento anterior deve operar de acordo com a sua capacidade. Caso contrário, haverá uma sobrecarga e a propagação desta para o equipamento seguinte e assim por diante, ocasionando uma perda de eficiência global do sistema.

De acordo com Schaffel (2002), alguns fatores definem o volume de cascalhos gerados durante a perfuração de um poço de petróleo. Por conseguinte, o volume de cascalho depende da profundidade do poço, das características das formações, do diâmetro e dos tipos de fluidos de perfuração que estão sendo utilizados durante a perfuração.

2.5 PENEIRAMENTO VIBRATÓRIO

As peneiras vibratórias são os primeiros equipamentos no sistema de controle de sólidos e possuem um papel fundamental na eficiência global do sistema. O bom dimensionamento da quantidade e qualidade das peneiras neste sistema contribui para evitar a sobrecarga dos hidrociclones (desareiadores e dessiltadores) e equipamentos seguintes. Deste modo, é necessário um peneiramento adequado do fluido de perfuração no estágio inicial de separação, pois sem o mesmo, a eficiência e a efetividade dos equipamentos que compõem o sistema de controle de sólidos da sonda posteriores às peneiras estarão seriamente comprometidas (PEREIRA, 2010).

De acordo com Pereira (2010), as peneiras utilizadas nas sondas de perfuração dos poços de petróleo devem ser projetadas para processar eficientemente todo o volume circulante de fluido de perfuração utilizados na operação e necessitam possuir as menores aberturas de tela compatíveis com a operação. Por conseguinte, alguns fatores interferem diretamente na eficiência das peneiras, dentre os quais: a vibração da peneira, a inclinação do cesto, o tipo de tela utilizada na operação, o tamanho da abertura da tela, entre outros.

A vibração tem o propósito de aumentar a capacidade de processamento do material alimentado à peneira. A ação de vibrar a peneira promove uma rápida separação entre as partículas sólidas e o líquido, objetivando reduzir a quantidade de líquido que é perdido por ficar aderido nas partículas sólidas. Ao mesmo tempo, promove o transporte das partículas sólidas em direção a saída de retido, liberando a área sobre a tela. Tendo em vista a máxima eficiência de recuperação do fluido de perfuração, os sólidos devem ser transportados sobre superfície da tela por um padrão pré-determinado de movimento elíptico, circular ou linear reduzindo a obstrução das aberturas da tela (GUERREIRO, 2015). A Figura 2.7 apresenta a imagem de uma peneira vibratória típica para peneiramento de fluido de perfuração.



Figura 2.7: Peneira de uma unidade de controle de sólidos (MI SWACO, 2017).

2.5.1 CARACTERÍSTICAS DO PENEIRAMENTO

Geralmente as peneiras vibratórias são caracterizadas pela largura e comprimento da superfície de peneiramento e são basicamente constituídas por um chassi robusto apoiado em molas ou coxins de borracha e possui um mecanismo acionador do movimento vibratório, como também um, dois ou três suportes para as telas (KELLY e SPOTSWOOD, 1982).

O movimento vibratório da peneira é realizado por um sistema de acionamento que, geralmente baseia-se em massas desbalanceadas. Normalmente a amplitude de vibração possui valores entre 3,0 mm e 8,0 mm e a rotação varia de 600 rpm a 1200 rpm. Entretanto, estes valores podem variar como no caso das peneiras de alta frequência que operam com amplitude de até 0,5 mm e rotação de 3600 rpm (IIZUKA, 2006).

A maioria das peneiras vibratórias utilizam um tanque de distribuição para receber o fluido proveniente da perfuração do poço. Este fluido de perfuração flui pelo descarregador, sendo distribuído uniformemente na tela de peneiramento. Esta tela de peneiramento é montada sobre um cesto que vibra para auxiliar no transporte de sólidos sobre a tela e na passagem de fluido pelas aberturas da tela. O motovibrador presente na peneira é o responsável por fornecer vibração ao cesto, e consiste em um motor equipado com corpos excêntricos rotatórios

acoplados ao seu eixo. O cesto 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 do cesto, 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 (AADE, 1999; ASME, 2005). Na Figura 2.8 está apresentado uma peneira com essas características.

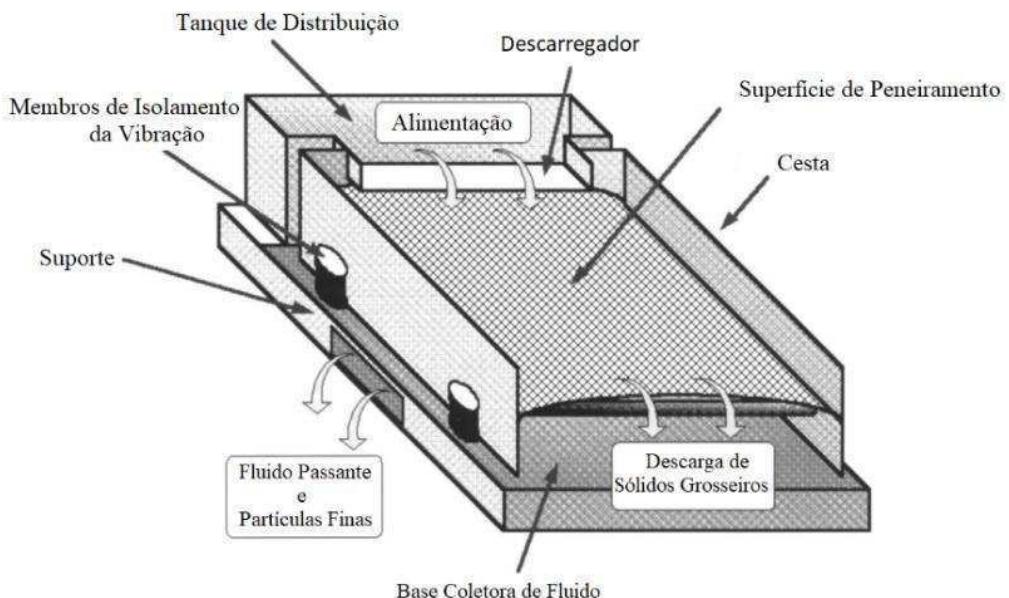


Figura 2.8: Peneira vibratória (adaptado de ASME, 2005).

2.5.2 INCLINAÇÃO DA TELA

A inclinação da tela é uma variável importante no peneiramento vibratório. A depender da inclinação da tela, esta altera a capacidade operacional de processamento de material alimentado na peneira e influencia no desempenho da operação.

Comercialmente existem diferentes configurações de inclinação da tela da peneira, objetivando o melhor desempenho na operação de peneiramento. A tela pode ser montada com a inclinação ajustada ascendente (inclinada) ou descendente (declinada), a depender da condição operacional desejada e do modelo da peneira como na Figura 2.9 (A, B, E e F) ou simplesmente ser montada na posição horizontal como na Figura 2.9 (C e D). As telas podem também ser montadas com inclinações diferentes como na Figura 2.9 (G e H) (AADE, 1999; ASME, 2005).

As peneiras podem ter uma única tela como na Figura 2.9 (A, C, E e G) ou ter mais de uma tela como nas Figuras 2.9 (B, D, F e H). Nas peneiras com múltiplas telas, o fluido passa pela tela superior antes de encontrar a tela inferior. Isso ocorre devido a colocação de bandejas entre as telas, permitindo que o material passante chegue apenas no início da próxima tela (AADE, 1999; ASME, 2005).

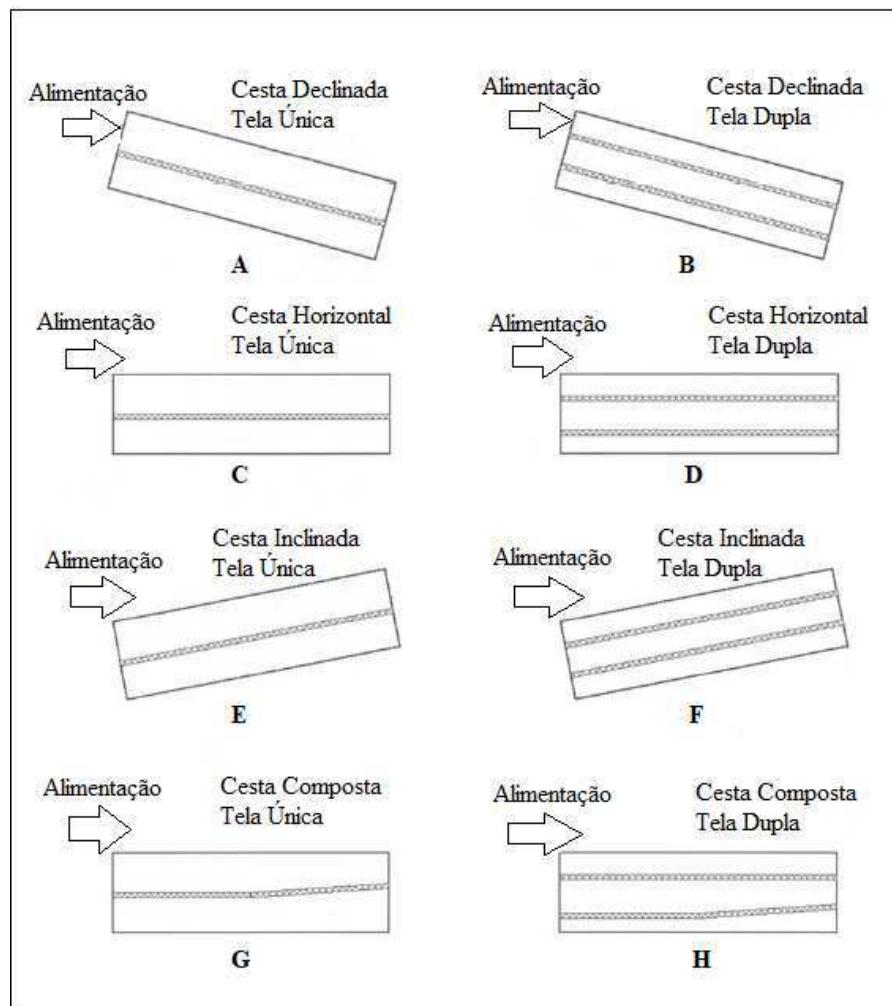


Figura 2.9: Configurações da tela da peneira vibratória (adaptado de ASME, 2005).

2.5.3 MOVIMENTOS

As peneiras vibratórias podem apresentar padrão de movimento de vibração diferente a depender do posicionamento dos motovibradores. Segundo Wills e Napier-Munn (2005), os movimentos principais são: circular, elíptico, linear e oval, conforme apresentado na Figura 2.10.

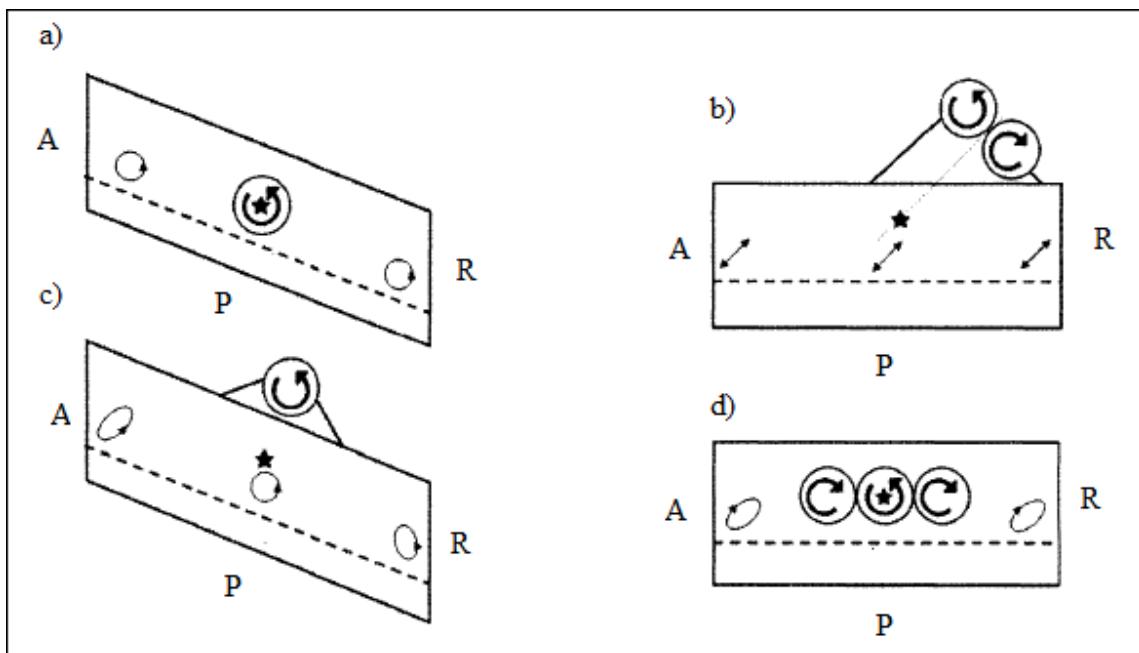


Figura 2.10: Padrões típicos de movimentos da peneira vibratória (A – alimentação; R – retido; P – passando) (adaptado de WILLS; MUNN, 2005).

Quando o eixo de vibração coincide com o centro de gravidade da peneira tem-se o movimento circular como representado na Figura 2.10 a). Já quando o eixo de vibração é instalado acima do centro de gravidade, ocorre o movimento elíptico em direção à descarga na alimentação, o movimento circular no centro da peneira e o movimento elíptico com inclinação para trás como na Figura 2.10 c). Essa configuração proporciona a rápida passagem das partículas no início da peneira e a redução de sua velocidade no final. O movimento linear ocorre quando são instalados dois motovibradores atuando em direções opostas como na Figura 2.10 b). Essa configuração de movimento pode ser utilizado tanto em peneiras horizontais quanto em peneiras inclinadas. Já o movimento oval ocorre ao utilizar três eixos de vibração como na Figura 2.10 d). Esse movimento possui os benefícios da capacidade obtida com o movimento linear e a eficiência do movimento circular.

De acordo com AADE (1999) e ASME (2005), as peneiras vibratórias podem produzir quatro tipos diferentes de movimento dependendo da orientação, localização e do número de motovibradores: elíptico desbalanceado, circular, linear e elíptico balanceado. Na Figura 2.11 estão apresentados os tipos de movimentos vibratórios.

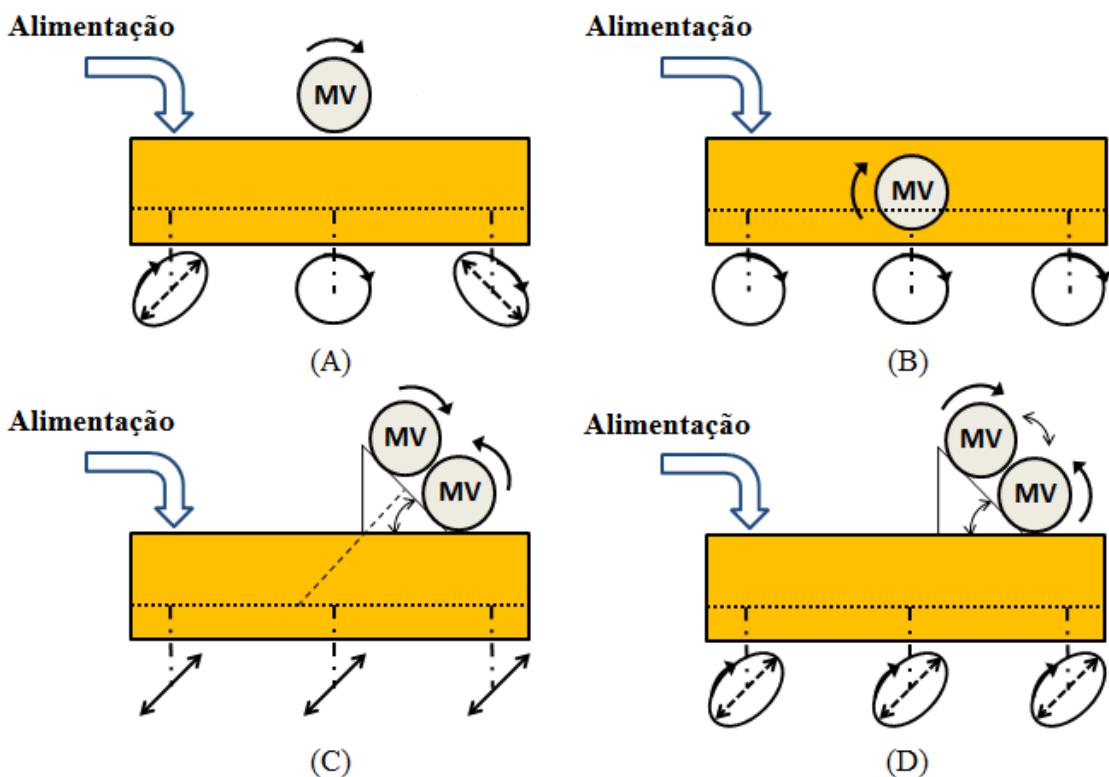


Figura 2.11: Tipos de movimentos vibratórios (ASME, 2005).

O movimento elíptico desbalanceado ocorre quando o motovibrador encontra-se acima do centro de massa da peneira como mostrado na Figura 2.11 (A). Esse movimento é de grande confiança mecânica, no entanto, tem como limite operar com telas de 30 a 40 *mesh*. Já o movimento circular ocorre quando a peneira tem o motovibrador localizado no centro de massa da peneira como mostrado na Figura 2.11 (B). Essa configuração melhora o transporte do material para o descarte e a eficiência de separação sólido-líquido. No entanto, as peneiras com o movimento circular permitem a utilização de telas de 80 a 100 *mesh*.

O movimento linear, apresentado na Figura 2.11 (C), é produzido por um par de motovibradores em paralelo girando em sentido oposto e proporciona o uso de telas de 200 *mesh*. Esse movimento permite operar o peneiramento com a cesta inclinada ascendentemente, proporcionando o aumento do tempo de residência do material sobre a tela. Os motovibradores devem ser montados formando um ângulo de 45° com a tela para que haja o equilíbrio entre a passagem de fluido pelas aberturas da tela e o transporte de cascalho. A movimentação em linha reta ajuda no maior transporte de cascalho e na maior vazão processada em telas mais finas. 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 enceramento das telas (que é causado por partículas pegajosas que cobrem as aberturas da tela).

No movimento elíptico balanceado, apresentado na Figura 2.11 (D), todos os eixos estão inclinados para a região de descarte da peneira e também permite o uso de telas de 200 *mesh*. Esse movimento é produzido por um par de motovibradores, paralelos ou distanciados com determinada angulação, girando em sentidos opostos. Essa configuração fornece elevado desempenho, assim como o linear, e menor incidência de enceramento da tela. Em contrapartida apresenta baixa capacidade de processamento em comparação com as peneiras de movimento linear.

2.5.4 DESEMPENHO DO PENEIRAMENTO VIBRATÓRIO

2.5.4.1 CAPACIDADE OPERACIONAL

A capacidade de operação de uma peneira vibratória é limitada pela vazão máxima de suspensão que a peneira consegue processar até o momento em que o fluido em excesso comece a ser descarregado na saída (retido) da peneira. No peneiramento vibratório existem dois limites capazes de determinar a capacidade (AADE, 1999; ASME, 2005):

- ✓ o limite do fluido é a máxima vazão do fluido de perfuração que a peneira conseguirá processar durante a operação;
- ✓ o limite de sólidos é a máxima quantidade de sólidos que a peneira conseguirá transportar até a saída de retido durante a operação.

Os dois limites estão relacionados de forma que a quantidade de fluido que pode ser processado diminuirá à medida que a quantidade de sólidos aumentar.

A capacidade de peneiramento também é afetada pela viscosidade e densidade do fluido, ou seja, a capacidade de peneiramento diminuirá se a viscosidade do fluido aumentar e a capacidade aumentará à medida que a densidade do fluido aumenta, devido ao aumento da pressão sobre a superfície da tela, atuando como uma força para conduzir o fluido através da tela.

2.5.4.2 VIDA ÚTIL DA TELA

Durante a operação do peneiramento vibratório ocorre o desgaste das telas utilizadas afetando o desempenho global da peneira. Neste sentido, a vida útil da tela é uma importante variável a ser considerada no processo de recuperação do fluido de perfuração. A vida útil da

tela refere-se ao tempo em que a mesma consegue operar sem que a operação de peneiramento fique comprometida (GUERREIRO, 2015).

Segundo Guerreiro (2015), existem diversos fatores que afetam a vida útil das telas, dentre eles: o desenho da tela, as características operacionais e as características do material a ser peneirado. No entanto, há algumas práticas que podem ser adotadas de modo a ajudar a maximizar a vida útil:

- ✓ manter a tela limpa;
- ✓ manter o tensionamento apropriado da tela;
- ✓ não sobrecarregar a tela;
- ✓ não operar a peneira sem fluxo sobre ela.

2.5.4.3 BALANÇO DE MASSA NO PENEIRAMENTO

De acordo com Felder e Rousseau (2005), antes de realizar o balanço de massa em um sistema é necessário saber a categoria na qual o sistema se encaixa. Os processos químicos podem ser classificados em: batelada, contínuo e semi-batelada. Deve-se também classificar o processo de acordo com as condições de operação: estado estacionário ou estado transiente.

Realizando o balanço de massa no sistema para um instante de tempo qualquer. Considerando que existe apenas um componente nas correntes de entrada e saída do sistema. Temos a Equação (2.1) do balanço:

$$A_j = E_j - S_j + G_j - C_j \quad (2.1)$$

em que:

A = Acúmulo da espécie j dentro do volume de controle;

E = Entrada da espécie j dentro do volume de controle;

S = Saída da espécie j dentro do volume de controle;

G = Produção da espécie j dentro do volume de controle;

C = Consumo da espécie j dentro do volume de controle;

A Equação 2.1 pode ser simplificada utilizando as seguintes condições de processo:

- ✓ não há produção da espécie j dentro do volume de controle ($G = 0$);
- ✓ não há consumo da espécie j dentro do volume de controle ($C = 0$);

- ✓ processo em estado estacionário, ou seja, não há acúmulo da espécie j dentro do volume de controle ($A = 0$);

Após a utilização das condições simplificadoras anteriormente citadas, o balanço de massa pode ser escrito da seguinte maneira:

$$0 = E - S \quad (2.2)$$

Reescrevendo a Equação (2.2):

$$E = S \quad (2.3)$$

Seja F a vazão mássica de alimentação da peneira, R a vazão mássica do material retido sobre a tela da peneira e P a vazão mássica que passa pela abertura da tela da peneira. x_F , x_R e x_P são as frações mássica de sólido presente em cada corrente, respectivamente, de acordo com a Figura 2.13.

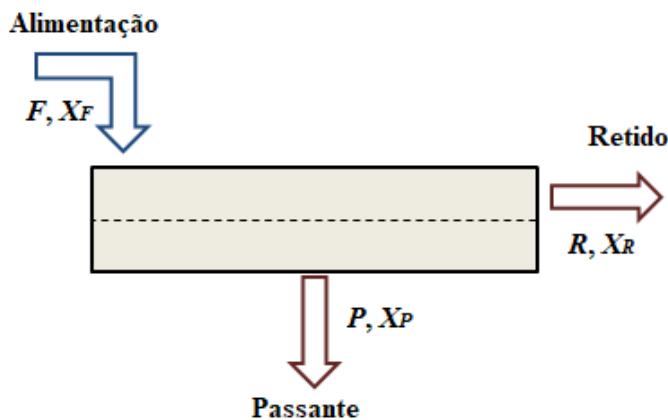


Figura 2.12: Esquema da peneira para realização do balanço de massa.

Considerando o processo do peneiramento vibratório em estado estacionário, pode-se utilizar a Equação (2.3) para representar o processo. Neste sentido, todo o material sólido que é alimentado na peneira (F) deve sair nas correntes do retido (R) e do passante (P). Por conseguinte, o balanço global de massa dos sólidos e o balanço do componente pode ser representado pelas Equações (2.4) e (2.5), respectivamente.

$$F = R + P \quad (2.4)$$

$$Fx_F = Rx_R + Px_P \quad (2.5)$$

A eficiência da operação de peneiramento é uma ferramenta importante para quantificar e analisar o peneiramento, pois ela é a medida da eficácia da separação entre o material sólido e o líquido. A fim de determinar a equação que proporcione calcular a eficiência (Equação 2.6), divide-se a Equação (2.5) por Fx_F :

$$\frac{Fx_F}{Fx_F} = \frac{Rx_R}{Fx_F} + \frac{Px_P}{Fx_F} \quad (2.6)$$

Reescrevendo a Equação 2.6:

$$I = \frac{Rx_R}{Fx_F} + \frac{Px_P}{Fx_F} \quad (2.7)$$

E_R é a razão que avalia a quantidade de material sólido retido que é coletada após o peneiramento em relação à quantidade alimentada, conforme apresentada na Equação (2.8).

$$E_R = \frac{Rx_R}{Fx_F} \quad (2.8)$$

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

$$E_P = \frac{Px_P}{Fx_F} \quad (2.9)$$

Portanto resulta em:

$$I = E_R + E_P \quad (2.10)$$

2.5.5 VARIÁVEIS OPERACIONAIS

2.5.5.1 FORÇA-G

A força-g é um adimensional de vibração utilizado na literatura para medir a vibração imposta à peneira, no qual é definida como a razão entre a aceleração vibracional e a aceleração gravitacional. A Equação 2.11 representa o adimensional de força-g.

$$\Gamma = \frac{Am(2\pi f)^2}{g} \quad (2.11)$$

em que:

Γ = adimensional de vibração (força-g);

Am = amplitude de vibração (m);

f = frequência de vibração (Hz)

g = aceleração gravitacional (m/s^2)

A Equação 2.11 é dependente da amplitude de vibração (Am) e da frequência de vibração (f). Neste sentido, várias combinações de amplitude e frequência fornecem o mesmo valor de força-g.

No trabalho de Dorry (2010) foi observado que a umidade residual dos sólidos retidos pela peneira não foi afetada significativamente para elevadas força-g (entre 5 e 9), como também para os diferentes tipos de movimentos vibratórios nestas magnitudes de vibração. Avaliou-se também que o aumento da força-g aplicada à peneira tende a aumentar não linearmente a capacidade operacional da peneira (ou vazão de fluido máxima que a peneira suporta). Entretanto, essa capacidade de operação é específica para cada tipo de peneira e para cada tipo de movimento vibratório.

Guerreiro (2015) estudou experimentalmente a influência da força-g no teor de umidade dos sólidos retidos e na eficiência granulométrica. Nesse trabalho foi observado que o aumento da força-g contribui para o aumento do teor de umidade residual dos sólidos retidos, enquanto que contribui para a diminuição da eficiência granulométrica de separação.

Freitas (2017) avaliou experimentalmente o comportamento dinâmico da peneira vibratória relacionando algumas variáveis operacionais, entre elas a força-g. No estado

estacionário, pode-se observar que a força-g possuía influência menor no teor de umidade dos sólidos retidos quando em comparação com a influência da concentração de sólidos alimentados. Para uma concentração de sólidos menor, o aumento da força-g causa um aumento no teor de umidade. Entretanto, para uma concentração maior de sólidos, a força-g possui pouco efeito na umidade dos sólidos retidos.

Barbosa *et al.* (2017) avaliaram a influência da força-g sobre a capacidade operacional da peneira vibratória e o teor de umidade residual dos sólidos retidos. Neste estudo, observou-se que o aumento da força-g proporcionou um sólido retido mais úmido, entretanto essa variável favoreceu o aumento da capacidade operacional, pois reduziu a área inundada pelo líquido.

2.5.5.2 CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS

Guerreiro (2015) estudou o teor de umidade do sólido retido e a eficiência de separação para alimentações com concentrações volumétricas (C_v) entre 1,0 e 3,0%. Notou-se que o aumento na concentração proporcionou a diminuição do teor de umidade residual, do mesmo modo que maiores concentrações proporcionaram uma eficiência de separação menor. Dessa maneira, avaliou-se que uma carga maior de sólidos sobre a tela favoreceu a competição pelas aberturas da tela, diminuindo a eficiência do sistema.

Freitas (2017) avaliou a influência da concentração volumétrica de sólidos na corrente de alimentação da peneira vibratória sobre a umidade dos sólidos retidos. Os resultados obtidos indicaram uma forte influência da concentração de sólidos na corrente de alimentação no teor de umidade dos sólidos retidos. O aumento desta variável proporcionou a diminuição da umidade e esse fato foi relacionado com a quantidade de material acumulado sobre a tela, que também aumentava com o aumento da concentração.

Barbosa *et al.* (2017) também estudaram a dependência do teor de umidade residual com a variável operacional concentração volumétrica de sólidos na alimentação entre 2,5 e 5,5%. Desse modo, observou-se que o aumento desta variável favoreceu a diminuição dos valores medidos para a variável estudada.

2.5.5.3 INCLINAÇÃO DA PENEIRA

Fowler e Lim (1959) estudaram experimentalmente a influência da inclinação descendente da cesta da peneira na eficiência de peneiramento a seco de areia. Nesse estudo, foram avaliadas inclinações com ângulos de 6°, 11°, 15° e 20°. Notou-se o aumento na eficiência média do processo para menores rotações com o aumento da inclinação. Porém, com a aplicação de vibrações mais intensas, notou-se que a eficiência decresce com o aumento da inclinação.

A partir da modelagem matemática e de experimentos para o peneiramento, Hoberock (1980) avaliou, a influência da inclinação descendente, 10° e 30°, com a área molhada da tela. Esse estudo demonstrou que o aumento da inclinação descendente da cesta da peneira proporciona o aumento da área molhada, pois aumenta a distância máxima percorrida pelo fluido. Também concluíram que a operação de peneiras com inclinações descendentes maiores necessitam de um comprimento maior de tela para a separação.

Raja *et al.* (2010) estudaram a influência da inclinação ascendente, entre 3° e 5°, no comprimento de tela utilizando um modelo de filtração. O modelo proposto apontou a diminuição do comprimento de tela com o aumento da inclinação da peneira independentemente do tamanho do sólido.

Guifeng e Xin (2011) avaliaram através de simulações numéricas utilizando o Método de Elementos Discretos (DEM), a influência da inclinação de tela descendente, entre 0 e 35°, sobre a eficiência de separação de uma peneira vibratória a seco. Nesse estudo, os autores notaram que o aumento da inclinação contribui para a diminuição da eficiência de separação.

No trabalho de Raja *et al.* (2012) foram avaliadas experimentalmente as inclinações ascendentes e descendentes da peneira, variando de 0° a 3°, a influência na capacidade operacional. Nesse estudo, os autores notaram que o aumento da inclinação descendente contribuiu para a diminuição da capacidade de operação. Entretanto, o aumento da inclinação ascendente contribuiu para o aumento da capacidade operacional.

Barbosa *et al.* (2017) avaliaram experimentalmente a influência da inclinação ascendente, entre 0° e 3°, sobre o teor de umidade residual e a capacidade operacional da peneira. Desse modo, observaram que o aumento desta variável proporcionou a diminuição do teor de umidade residual e o aumento da capacidade operacional devido à diminuição da região inundada.

2.5.6 OPERAÇÃO SOB VÁCUO

Larson *et al.* (2013) propuseram um novo equipamento no processo de tratamento do fluido de perfuração em substituição as peneiras vibratórias. O sistema transportador a vácuo (*vacuum conveyer system – VCS*) é um equipamento enclausurado constituído de uma tela rotacional e de um sistema de vácuo. Nesse equipamento, o fluido de perfuração foi alimentado e a parte líquida e eventualmente os gases de hidrocarbonetos foram sugados pela tela por um sistema de vácuo, em seguida, a mistura gasosa foi separada e o líquido voltou para a operação. No estudo, o VCS se mostrou mais silencioso que o peneiramento vibratório e não emitiu gases, nem produziu vibração estrutural. Em comparação às peneiras vibratórias, o VCS manteve a capacidade da planta, proporcionou eficiente limpeza do fluido de perfuração e secagem dos sólidos.

MI SWACO (2017) recomendou a instalação do separador *screen pulse* nas peneiras vibratórias durante a perfuração dos poços *Aguarico 36D*, *Aguarico 42D* e *Aguarico 51D* no campo de *Shushufindi*, localizado no Equador. Esse separador foi composto por uma bandeja acoplada na última tela da peneira de modo a permitir a aplicação de vácuo nesta área. Comparando o poço *Aguarico 28D*, que não usava este sistema, com os poços que usaram o separador *screen pulse*, o teor de fluido nos sólidos retidos diminuiu 10% nas seções superior e intermediária e 14% na seção final da peneira.

CAPÍTULO 3 - MATERIAL E MÉTODOS

3.1 UNIDADE EXPERIMENTAL

A unidade experimental representativa do primeiro equipamento do sistema de controle de sólidos que foi utilizada para realização dos experimentos e coleta dos dados foi montada no laboratório da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, sendo apresentada na Figura 3.1. A unidade consistiu basicamente por uma peneira vibratória em escala piloto, equipada com dois motovibradores e um quadro no qual esteve montada a tela de separação; um sistema de alimentação da suspensão sólido-líquido; um sistema de coleta do retido e do passante; um sistema de controle de força-g; e um sistema de aplicação do vácuo que está apresentado na Figura 3.2. Na Tabela 3.1 está apresentada uma lista com cada equipamento/instrumento que compõe a unidade experimental da Figura 3.1. E, na Tabela 3.2, estão apresentados os componentes do sistema de vácuo.

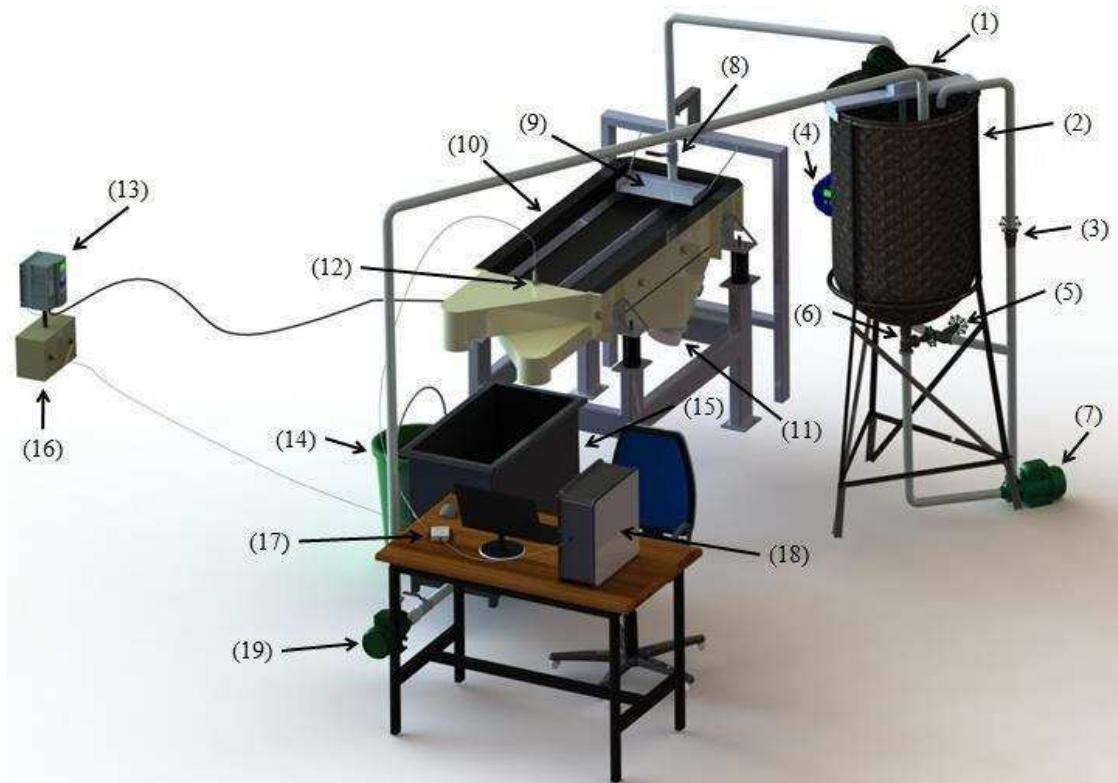


Figura 3.1: Unidade experimental.

Tabela 3.1: Equipamentos/Instrumentos da unidade experimental.

Número	Equipamento/Instrumento
(1)	Agitador mecânico
(2)	Tanque de mistura de alimentação
(3)	Válvula gaveta de recirculação
(4)	Medidor de vazão
(5)	Válvula gaveta de alimentação da peneira
(6)	Válvula gaveta de abertura do tanque de alimentação
(7)	Bomba de recirculação/alimentação
(8)	Válvula borboleta de alimentação da peneira
(9)	Calha de distribuição da alimentação sobre a tela da peneira
(10)	Peneira vibratória
(11)	Motovibradores
(12)	Sensor piezoelétrico
(13)	Inversor de frequência
(14)	Tanque de coleta do sólido retido
(15)	Tanque de coleta do fluido passante
(16)	Quadro de carga dos equipamentos e instrumentos da peneira
(17)	Placa de aquisição de dados
(18)	Computador de operação da peneira
(19)	Bomba de realimentação do tanque de mistura

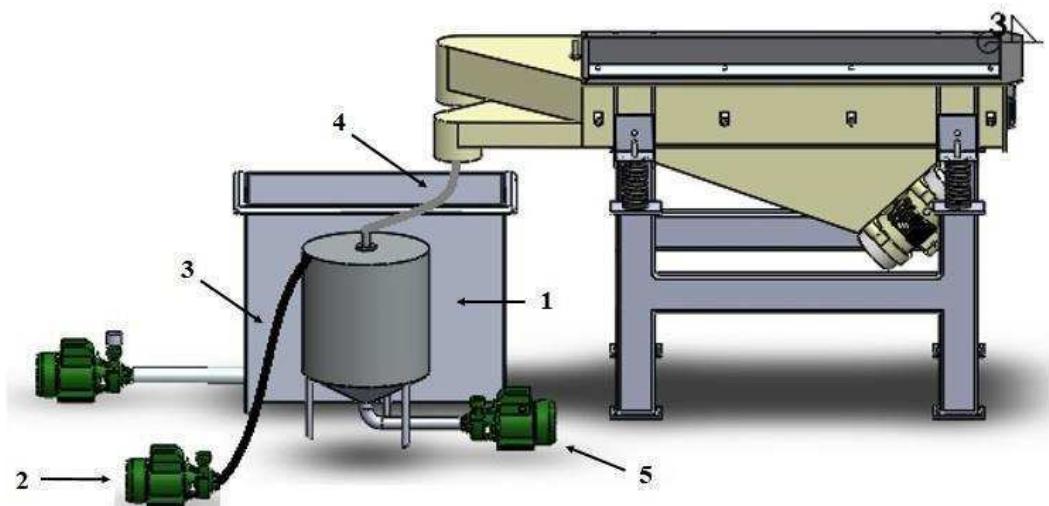
**Figura 3.2:** Sistema de aplicação de vácuo.

Tabela 3.2: Equipamentos/Instrumentos do sistema de aplicação de vácuo.

Número	Equipamento/Instrumento
1	Tanque de aplicação do vácuo e armazenamento do líquido
2	Bomba de vácuo
3	Tubulação de vácuo
4	Tubulação de transmissão do vácuo para a peneira
5	Bomba para recuperação do fluido do tanque

3.1.1 PENEIRA VIBRATÓRIA

O protótipo de peneira vibratória utilizado na realização deste trabalho foi fornecido pela empresa *Vibrokraft*, com 1,60 m de comprimento, 0,81 m de largura e 1,0 m de altura, como apresentada na Figura 3.3.

**Figura 3.3:** Peneira vibratória.

Na peneira foi utilizada uma tela de 175 *mesh* com tamanho de abertura de 95 μm e área aberta de 42% no peneiramento sólido-líquido. Essa tela foi fornecida pela empresa Tegape. Guerreiro (2015) cita que nas peneiras das unidades de perfuração de poços é utilizada peneira de até 200 *mesh*. Para proporcionar o movimento vibratório necessário, no peneiramento utilizou-se dois motovibradores modelo VR4-07 da *vibrokraft* que ficavam acoplados na parte inferior da peneira e forneceram movimento linear ao protótipo. Cada um dos motovibradores possuía 0,75 cv de potência e rotação máxima de 1700 rpm, sendo os

mesmos apresentados na Figura 3.4. Para proporcionar diferentes inclinações à peneira utilizou-se um macaco manivela que está apresentado na Figura 3.5.

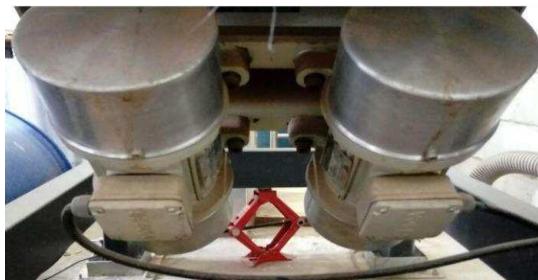


Figura 3.4: Motovibradores.



Figura 3.5: Macaco manivela.

3.1.2 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO

Acoplado a peneira vibratória encontrava-se um tanque de 300 L que armazenava a suspensão sólido-líquido o qual possuía um agitador mecânico e um sistema de recirculação com bifurcação, como apresentado na Figura 3.6. Esse sistema apresentava quatro válvulas que permitiam controlar a recirculação e alimentação da suspensão na peneira. O agitador mecânico e a recirculação exerciam a função de homogeneizar a suspensão e proporcionar uma alimentação com concentração constante. Para monitorar e permitir controlar a vazão mássica de alimentação foi utilizado um medidor de vazão mássico do tipo coriolis modelo *Contech TCM28K*. O medidor de vazão mássico coriolis é apresentado na Figura 3.7.

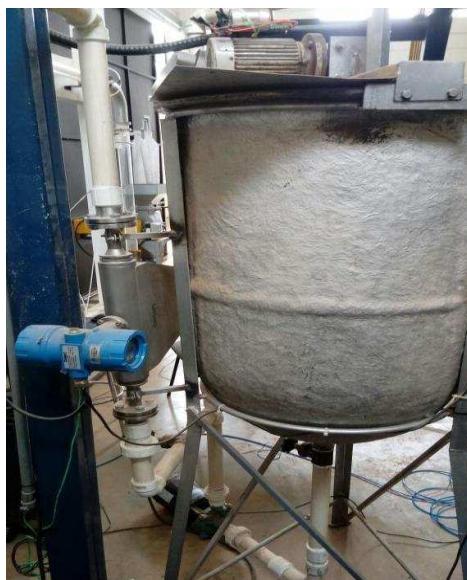


Figura 3.6: Sistema de alimentação.



Figura 3.7: Coriolis.

3.1.3 SISTEMA DE COLETA DO RETIDO E DO PASSANTE

Para coletar o fluido passante pela tela da peneira utilizou-se um tanque de 200 L que estava ligado a uma bomba centrífuga a qual possuía uma tubulação que retornava o fluido passante ao tanque de alimentação. Entretanto, durante a realização dos experimentos, a bomba centrífuga de realimentação permaneceu desligada para não haver diluição do material alimentado. Já para a coleta do material sólido retido utilizou-se um recipiente com aproximadamente 50 L que encontrava-se posicionado em cima de uma balança, *UDC CO 30/5* para coletar a massa de retido durante o experimento. Este sistema está apresentado na Figura 3.8.



Figura 3.8: Sistema de coleta dos sólidos retidos e do fluido passante.

3.1.4 SISTEMA DE CONTROLE DA FORÇA-G

Para controlar a força-g imposta à peneira utilizou-se um medidor de vibração (acelerômetro) piezoelétrico da marca *PCB Piezoeletronic* modelo 646B00, apresentado na Figura 3.9, que enviava um sinal para o computador por meio de uma placa de aquisição de dados da *National Instruments* modelo USB 6008 apresentada na Figura 3.10. Este sinal era encaminhado para o programa implementado no *LabView®* da *National Instruments*, como ilustrado nas Figuras 3.12 (paineel frontal) e 3.13 (diagrama de blocos). Um algoritmo de controle desenvolvido na programação produzia um sinal de controle para a placa de aquisição de dados da *National Instruments* a qual enviava um sinal para o inversor de frequência *WEG CFW700*, apresentado na Figura 3.11, que atuava na rotação dos motovibradores.



Figura 3.9: Acelerômetro 1D.



Figura 3.10: Placa de aquisição de dados.



Figura 3.11: Inversor de frequência.

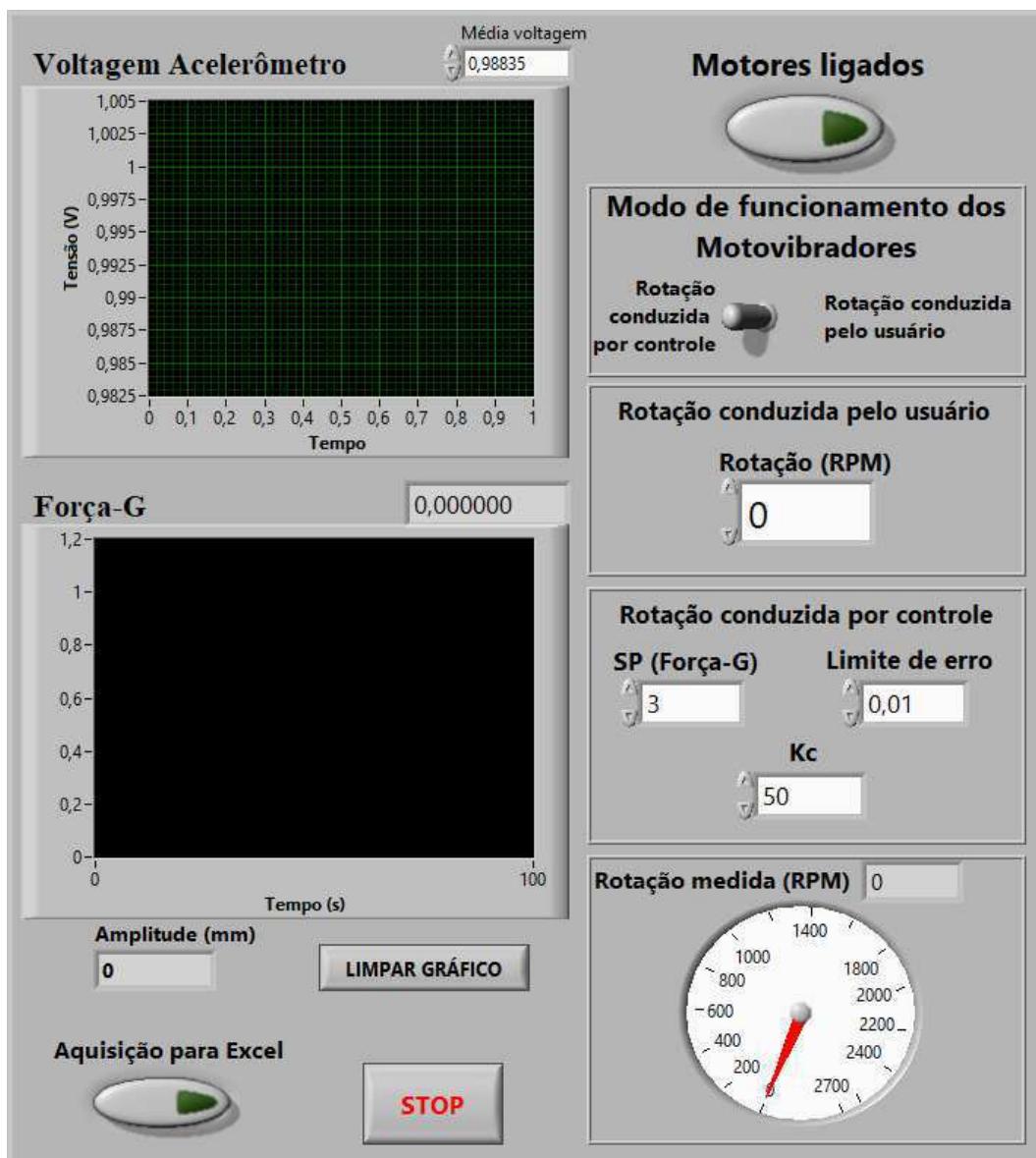


Figura 3.12: Painel frontal da operação desenvolvido no *LabView*.

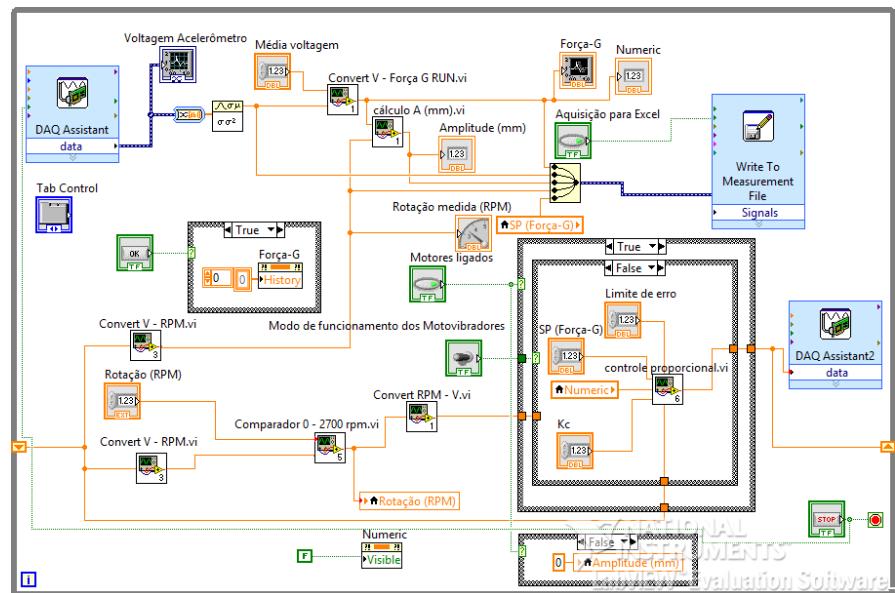


Figura 3.13: Diagrama de bloco da operação desenvolvido no *LabView*.

3.1.5 SISTEMA DE APLICAÇÃO DO VÁCUO

Para a aplicação do vácuo na seção de secagem da peneira vibratória foi utilizada uma bomba de vácuo conectada a um tanque de aplicação de vácuo por meio de uma tubulação. O vácuo foi aplicado em uma bandeja colocada na última seção da peneira (próximo à saída do retido) por uma tubulação de 1 in(polegada) que estava conectada ao tanque. O líquido que era retirado da peneira devido ao vácuo era armazenado no próprio tanque de aplicação do vácuo e após o experimento esse líquido era retornado para o tanque de alimentação com o auxílio de uma bomba centrifuga. O sistema de aplicação de vácuo é apresentado na Figura 3.14.



Figura 3.14: Sistema de aplicação do vácuo.

3.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Um dos problemas mais comuns na realização de experimentos, é determinar a influência de uma ou mais variáveis operacionais sobre uma outra variável resposta de interesse. Estatisticamente tem o interesse em descobrir como a resposta depende dos fatores do processo. Neste contexto, o planejamento experimental consiste em identificar o efeito de um ou mais fatores experimentais (variáveis de entrada) sobre as respostas (variáveis de saída) do sistema em estudo, utilizando os princípios estatísticos, com o objetivo de obter-se o máximo de informações realizando o menor número possível de experimentos. Além das variáveis anteriormente citadas, há ainda as variáveis não-controladas, ou seja, as variáveis inseridas no sistema e que não são incluídas no estudo do planejamento experimental (BARROS NETO *et al.*, 2001).

Na Figura 3.15 encontra-se o sistema com as variáveis representativas do planejamento experimental. Um certo número de fatores, F_1, F_2, \dots, F_n , atuando sobre o sistema em estudo, produz as respostas R_1, R_2, \dots, R_n . Há uma relação entre as variáveis de saída e de entrada a qual pode ser modelada matematicamente por meio de uma função desconhecida. O objetivo dos experimentos é descobrir essa função, ou pelo menos obter uma aproximação satisfatória para ela. Com esse conhecimento, torna-se possível o entendimento do processo em estudo, e assim escolher as melhores condições de operação do sistema (BARROS NETO *et al.*, 2001).

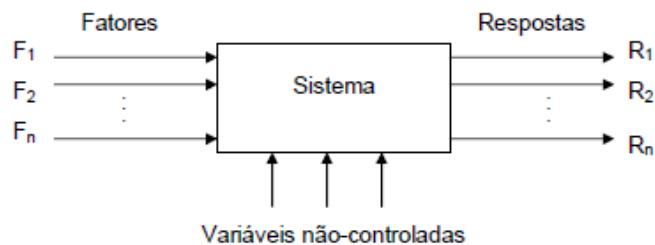


Figura 3.15: Sistema ligado as variáveis (fatores, respostas e variáveis não-controladas).

Fonte: AMORIM (2003)

De acordo com Barros Neto *et al.* (2001), a primeira coisa que deve ser feita no planejamento experimental é decidir quais são os fatores e as respostas que serão estudadas. Geralmente os fatores são variáveis controláveis. No entanto, as vezes existem fatores que

podem afetar as respostas, mas que não tem condições de serem controladas. Deve-se tomar cuidado com esses tipos de fatores para que seu efeito não seja confundido com os efeitos de interesse. Após decidir os fatores e as respostas deve-se definir o objetivo dos experimentos para que então possa escolher o planejamento apropriado com as especificações detalhadas de todas as operações experimentais que devem ser realizadas.

O planejamento experimental é uma ferramenta poderosa para estudar o efeito conjunto de vários fatores sobre uma ou mais variáveis respostas de interesse e, por isso, é classificado como um método do tipo simultâneo. Uma das técnicas mais conhecidas é o planejamento fatorial, no qual estão envolvidos k fatores (ou variáveis) cada um deles presente em diferentes níveis. Para a realização dos experimentos do planejamento fatorial, escolhe-se os fatores em níveis diferentes e realiza-se os experimentos para todas as combinações possíveis dos níveis selecionados (NEVES *et al.*, 2002; SILVA, 2008).

De modo simples, o planejamento fatorial pode ser representado por b^k , sendo “ k ” o número de fatores e “ b ” o número de níveis escolhido. Neste trabalho foi utilizado um planejamento fatorial 3^k .

No planejamento fatorial a três níveis, as variáveis independentes são codificadas como: -1 que representa o menor nível; 0 que representa o nível central e +1 que representa o maior nível. A Tabela 3.3 apresenta o planejamento fatorial utilizado para a realização dos experimentos deste trabalho.

Tabela 3.3: Planejamento fatorial utilizado neste trabalho.

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

Para a realização dos experimentos objetivando avaliar as variáveis que afetam o desempenho da peneira vibratória, foram definidas como variáveis independentes: a força-g

aplicada a peneira (como variável codificada x_1), a inclinação da tela (como x_2) e a concentração volumétrica de sólidos na alimentação (como x_3). A Tabela 3.4 apresenta a correspondência de cada variável com sua forma codificada.

Tabela 3.4: Níveis codificados do planejamento.

Nível	x_1	x_2	x_3
-1	3,0	0	2,0
0	4,0	1,5	4,0
1	5,0	3,0	6,0

No peneiramento vibratório existem diversas variáveis que afetam o processo. Nesse sentido, para realização dos experimentos foram fixadas a vazão de alimentação e a tela de peneiramento. A vazão de alimentação da peneira utilizada neste trabalho foi de 40 kg/min de suspensão e a tela de peneiramento utilizada foi de 175 mesh com o tamanho de abertura (ϕ) de 95 μm e porcentagem de área aberta (ψ) de 42%. Essas propriedades da tela de peneiramento foram obtidas junto à Tegape, empresa fornecedora da tela.

3.3 RESPOSTAS AVALIADAS

Nas unidades industriais que promovem a separação sólido-líquido (entre o fluido de perfuração e os cascalhos gerados durante a perfuração) existem diversos índices de desempenho da operação, ou seja, existem variáveis respostas que quantificam a recuperação do fluido. Esses índices estão relacionados com os fatores econômicos e ambientais.

Nesse sentido, as variáveis respostas estudadas neste trabalho são: o teor de umidade residual (%), a porcentagem de sólidos retidos pela peneira (%) e a porcentagem de área ocupada pelo líquido (%).

3.3.1 TEOR DE UMIDADE RESIDUAL

O teor de umidade residual dos sólidos retidos, refere-se ao percentual de fluido de perfuração que saiu na corrente de retido juntamente com os sólidos retidos, ou seja, é a porcentagem de umidade presente nos sólidos retidos, ao qual devem possuir a umidade de acordo com a legislação ambiental.

Para avaliar a influência das variáveis independentes sobre essa resposta, foram coletadas amostras dos sólidos retidos e ao final do experimento o sólido úmido coletado era pesado e encaminhado a uma estufa aquecida a 105°C durante 24 h e após esse tempo pesava a massa do sólido seco. O teor de umidade residual foi obtido com a utilização das Equações (3.1) e (3.2). Essas equações também foram utilizadas por Dorry (2010) e Freitas (2017) para o estudo do teor de umidade residual nos sólidos retidos.

$$x'_{UR} = \frac{m_U - m_S}{m_U} \quad (3.1)$$

Sendo que: x'_{UR} é a razão de líquido nos sólidos retidos; m_U é a massa da amostra de sólidos retidos úmido; m_S é a massa da amostra de sólidos retidos seco.

O teor de umidade residual da corrente de sólidos retidos é a representação em porcentagem da razão de fluido x'_{UR} .

$$U(\%) = 100x'_{UR} \quad (3.2)$$

Dorry (2010) realizou a secagem do material a 180°C até a massa do sólido seco permanecer constante, enquanto que Guerreiro (2015) e Freitas (2017) realizaram a secagem em estufa à 105°C durante 24 h e tiveram resultados satisfatórios para o teor de umidade residual dos sólidos retidos obtendo os sólidos completamente secos após este tempo.

3.3.2 PORCENTAGEM DE SÓLIDOS RETIDOS

A porcentagem de sólidos retidos refere-se a porcentagem de sólidos que ficava retido pela tela de peneiramento em comparação com a quantidade alimentada na peneira. Essa resposta é importante para quantificar a eficiência da separação sólido-líquido.

O cálculo da porcentagem de sólidos retidos seguiu a metodologia descrita na Seção 2.5.4.3. Durante os experimentos eram anotadas as massas da corrente de retido (inicial, a cada 20 segundos e a massa final) juntamente com o tempo do experimento e também a vazão de alimentação. Essa resposta foi calculada uma vez para cada experimento do planejamento experimental. A porcentagem de sólidos retidos foi obtida com a utilização da Equação (2.8).

3.3.3 PORCENTAGEM DE ÁREA OCUPADA PELO LÍQUIDO (PORCENTAGEM DE ÁREA MOLHADA)

A porcentagem de área ocupada pelo líquido é uma resposta importante para quantificar a capacidade operacional da peneira de modo a permitir ao operador aumentar a vazão de material que será processado em uma determinada peneira.

Essa resposta foi estudada a fim de verificar a influência do vácuo sobre a diminuição da área ocupada pelo fluido. No entanto, devido a dificuldades operacionais, o fluido não conseguiu alcançar a área de aplicação do vácuo e, portanto, não foi influenciada por essa condição operacional.

Para obtenção desta resposta, foi necessário a utilização do *software imageJ* para calcular a área de interesse. Na Figura 3.16 está apresentada a interface do programa e a seleção das áreas de interesse (área ocupada pelo líquido e a área total de peneiramento).



Figura 3.16: Interface do *software ImageJ*. a) seleção da área ocupada pelo líquido; b) seleção da área total de peneiramento.

Com os resultados de área apresentada pelo *software ImageJ*, pode-se utilizar a Equação (3.3) para determinar a porcentagem de área ocupada pelo líquido.

$$A_M (\%) = 100 \frac{A_L}{A_T} \quad (3.3)$$

na qual, A_L é a área ocupada pelo líquido e A_T é a área total de peneiramento.

3.3.4 PONTO ÓTIMO DE OPERAÇÃO DO PENEIRAMENTO VIBRATÓRIO SOB VÁCUO

Neste trabalho também foi determinado o ponto ótimo dentro da região experimental estudada que apresente um baixo teor de umidade residual (devido a legislação ambiental), uma elevada porcentagem de sólidos retidos e uma baixa porcentagem de área ocupada pelo líquido (para proporcionar o aumento da capacidade operacional). Deste modo, realizou um estudo de otimização a partir dos modelos obtidos para cada resposta, sendo que estes foram avaliados de forma iterativa com auxílio do software Excel, de modo a maximizar a função objetivo (F_{obj}) apresentada na Equação 3.4.

$$F_{obj} = F_U F_{ER} F_{AM} \quad (3.4)$$

As funções F_U , F_{ER} e F_{AM} consistem na normalização das respostas obtidas neste trabalho para o peneiramento operando sob vácuo, sendo respectivamente teor de umidade residual (U), porcentagem de sólidos retidos (E_R) e porcentagem de área ocupada pelo líquido (A_M). Essas funções são expressas pelas Equações 3.5, 3.6 e 3.7.

$$F_U = \frac{U_{MAX} - U}{U_{MAX} - U_{MIN}} \quad (3.5)$$

$$F_{ER} = \frac{E_R - E_{R_{MIN}}}{E_{R_{MAX}} - E_{R_{MIN}}} \quad (3.6)$$

$$F_{AM} = \frac{A_{M_{MAX}} - A_M}{A_{M_{MAX}} - A_{M_{MIN}}} \quad (3.7)$$

Os termos das equações que apresentam os subscritos MIN e MAX representam os valores mínimos e máximos obtidos pelos modelos, respectivamente. Essas equações são semelhantes às descritas por Guerreiro (2015).

3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

3.4.1 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS SÓLIDOS UTILIZADOS

Para determinar a distribuição granulométrica dos sólidos foi utilizado o peneiramento no aparelho *AS 300 control* da *Retsch* com um conjunto de peneiras da série *Mesh/Tyler*, como apresentado na Figura 3.17. O peneiramento foi conduzido com 2000 g de sólidos, amplitude de 1,8 mm durante 15 minutos. Determinou-se também o diâmetro médio de Sauter através da Equação (3.8).



Figura 3.17: Peneiras da série *Mesh/Tyler*.

$$d_{PS} = \frac{1}{\sum \left(\frac{x_i}{d_i} \right)} \quad (3.8)$$

3.4.2 DENSIDADE REAL DOS SÓLIDOS UTILIZADOS

A densidade real dos sólidos utilizados no peneiramento vibratório foi determinada através da técnica de picnometria a gás Hélio realizada no equipamento *AccuPyc 1331* da Micromeritics.

3.4.3 VISCOSIDADE DINÂMICA DO FLUIDO UTILIZADO

Para determinar a viscosidade dinâmica do fluido foi utilizado o equipamento *R/S Plus Rheometer* da *Brookfield* apresentado na Figura 3.18. Para uso do reômetro, era necessário uma amostra de 45 mL e os dados de viscosidade foram obtidos instantaneamente com o uso do software *Rheo 3000*. Durante esse experimento há um banho termostático ligado a uma jaqueta de aquecimento para manter a temperatura do material em 25°C.



Figura 3.18: Reômetro *Brookfield*.

3.5 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para realização dos experimentos, preparou-se a suspensão de água, goma xantana, formaldeído e os sólidos para cada condição experimental.

Para simular o fluido de perfuração utilizou-se uma mistura de água e goma xantana que foi pesada previamente em balança analítica de precisão a fim de obter uma concentração mássica de 0,1% e utilizou-se um *mixer* para promover a homogeneização. De acordo com Bicalho (2015), este fluido simulante apresenta o comportamento reológico não-Newtoniano e assemelha-se com os fluidos de perfuração reais, porém não fornecem altos valores de viscosidade.

A suspensão foi preparada 24 horas antes do experimento com as válvulas de recirculação abertas e sob ação do agitador mecânico com a finalidade de obter-se completa hidratação da goma xantana, sendo adicionado um volume (em mililitros) da solução de

formaldeído 31% numericamente igual a massa de goma xantana (em gramas) utilizado a fim de evitar o desenvolvimento de microorganismos na suspensão conforme utilizado por Pereira (2006), Bicalho (2015) e Freitas (2017).

Os sólidos utilizados nos experimentos foi areia padronizada fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) de três frações granulométricas diferentes, no qual foi preparado uma mistura com porções iguais dos três tipos.

A quantidade de sólidos que foi preparada em cada experimento foi definida pela Equação (3.9) de acordo com a concentração volumétrica.

$$m_s = \rho_s V_{susp} \frac{C_V (\%)}{100 - C_V (\%)} \quad (3.9)$$

em que: m_s é a massa de areia adicionada; ρ_s é a densidade do sólido; V_{susp} é o volume da suspensão; C_V é o concentração volumétrica de sólidos na suspensão.

Durante o experimento, a suspensão encontrava-se no tanque de alimentação com a válvula de recirculação aberta, como também a bomba de recirculação e o agitador ligados para proporcionar uma constante agitação e uma homogeneização completa da mistura.

Antes de iniciar o experimento, a tela de peneiramento foi lubrificada com a suspensão para evitar a interferência causada por atrito no transporte inicial do material retido, como proposto por Guerreiro (2015). Logo após, acionou-se os motovibradores e através da frequência de vibração foi monitorada a força-g até o *set point* do experimento que foi controlado pelo programa no *software LabView*.

Ligou-se o celular *Lg X Power* com qualidade de filmagem *full hd* para aquisição dos vídeos dos experimentos a fim de determinar a porcentagem de área ocupada pelo líquido.

Coletou-se uma amostra da suspensão sólido-líquido de cada concentração volumétrica estudada para posterior análise da reologia.

Em seguida iniciou-se o experimento com a abertura da válvula de alimentação e ajustou-se a vazão de alimentação desejada (nesse trabalho foi de 40 kg/min) por meio de uma válvula. Essa vazão foi escolhida devido a limitações experimentais. Nos experimentos operando a vácuo, ligou-se a bomba de vácuo após abrir a válvula de alimentação.

Com a alimentação aberta, esperou-se o material sair na corrente de retido, e iniciou-se a contagem do tempo do experimento. A coleta em triplicata das amostras de sólidos retido úmido foi realizada a cada 20 s em bêqueres previamente numerados e pesados. Em seguida, os sólidos retidos úmidos foram pesados e encaminhados a uma estufa a 105°C por 24 h e após

esse tempo os sólidos retidos, já secos, foram pesados. Durante o experimento, os sólidos retidos foram coletados em um recipiente colocado na saída da corrente de sólidos retiros e no fim do experimento essa massa de sólidos retidos foi pesada utilizando-se uma balança, e anotou-se o tempo final do experimento.

Após o fim do experimento, os sólidos retidos coletados foram retornados para o tanque de alimentação manualmente e o líquido passante foi retornado para o tanque de alimentação com o auxílio de uma bomba centrifuga localizada na saída do tanque que recolhe o passante.

Os experimentos foram realizados no mesmo dia para evitar a mudança brusca da viscosidade da suspensão devido ao “envelhecimento” da goma xantana utilizada na preparação.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados neste capítulo mostram a dependência das respostas estudadas com algumas das variáveis operacionais do peneiramento vibratório. Devido ao grande número de variáveis operacionais que afetam este equipamento, a obtenção de modelos fenomenológico não é trivial. Deste modo, faz-se necessário a busca por modelos semi-empíricos que permitam compreender e atuar nas variáveis operacionais para proporcionar a melhor eficiência deste processo.

Para obtenção da superfície de resposta, dos dados experimentais, que representa o modelo do sistema estudado, é necessário ter uma equação que correlacione a resposta y com as variáveis operacionais x_i . A Equação (4.1) é bastante utilizada e considera os efeitos individuais e quadráticos das variáveis x_i e as interações, bem como o erro de ajuste (ε) associado (GUERREIRO, 2015).

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

A partir dos valores experimentais e utilizando-se o método dos mínimos quadrados é possível estimar os parâmetros β_i , β_{ii} e β_{ij} da Equação (4.1), denominados estimadores de mínimos quadrados (EMQ), e que são representados por b_i , b_{ii} e b_{ij} na Equação (4.2), devido a uma regressão não-linear múltipla. O objetivo de determinar esses estimadores é a minimização do erro associado à equação de regressão proposta.

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

Os estimadores relacionados as variáveis codificadas x_1 (força-g), x_2 (inclinação da tela) e x_3 (concentração volumétrica de sólidos na alimentação) podem ser determinados por regressão não-linear múltipla. Os resíduos gerados pela regressão estão apresentados no Apêndice B.

Neste trabalho foi utilizado o *software Statistica* para determinação dos parâmetros da Equação (4.2) a fim de obter os modelos de cada resposta estudada. Este *software* também foi utilizado para obter as superfícies de resposta.

A análise granulometria dos sólidos utilizados nos experimentos foi determinada com o auxílio das peneiras apresentadas na Figura 3.17. A faixa granulométrica obtida no experimento para os sólidos foi de 0,09 mm a 1,4 mm. Os valores obtidos se encontram dentro da faixa granulométrica de sólidos de perfuração reais avaliados por Pereira (2013). O diâmetro médio de Sauter dos sólidos utilizados foi de 0,373 mm.

A densidade dos sólidos utilizados foi determinada por picnometria a gás hélio e vale 2,6698 g/cm³ com desvio padrão de 0,0015 g/cm³. Esse valor é próximo ao obtido por Pereira (2013) que foi de 2,51 g/cm³ com desvio padrão de 0,02 g/cm³.

4.1 CONDIÇÃO A (PENEIRAMENTO SEM VÁCUO)

Na realização destes experimentos foram coletadas amostras da suspensão para cada concentração volumétrica estudada a fim de determinar a viscosidade dinâmica. Essas amostras foram guardadas sobre refrigeração e após a realização de todos os experimentos foram realizados os testes de viscosidade como descrito no Item 3.4.3. Na Tabela 4.1 encontra-se o valor médio e o desvio padrão da viscosidade dinâmica da suspensão utilizada nos experimentos.

Tabela 4.1: Viscosidade dinâmica da suspensão nos experimentos sem vácuo.

Concentração Volumétrica de sólidos	Viscosidade (cP)	Desvio Padrão
2	5,79	0,95
4	5,10	0,72
6	4,31	0,33

Os resultados da Tabela 4.1, mostram que houve uma pequena variação da viscosidade entre os experimentos com concentrações volumétricas diferentes, mas o desvio padrão demonstra que os valores são próximos.

4.1.1 TEOR DE UMIDADE RESIDUAL (SEM VÁCUO)

Todos os resultados do teor de umidade residual coletados para o peneiramento vibratório convencional (sem vácuo) estão apresentados no Apêndice A. Os resultados

selecionados para analisar o teor de umidade residual nesta seção são referentes ao valor médio das amostras coletadas juntamente com o desvio padrão. Na Tabela 4.2 estão apresentados as médias e os desvios padrão (excluindo os *outlets*) do teor de umidade residual obtido em triplicata de acordo com o planejamento experimental proposto.

Tabela 4.2: Resultados experimentais para o teor de umidade residual sem vácuo.

EXP.	x_1	x_2	x_3	Teor de umidade residual	Desvio Padrão
1	-1	-1	-1	21,95	0,12
2	0	-1	-1	21,93	0,26
3	1	-1	-1	22,18	0,13
4	-1	0	-1	21,72	0,1
5	0	0	-1	21,08	0,19
6	1	0	-1	21,67	0,01
7	-1	1	-1	21,97	0,18
8	0	1	-1	21,48	0,05
9	1	1	-1	21,50	0,18
10	-1	-1	0	19,70	0,18
11	0	-1	0	20,13	0,17
12	1	-1	0	20,33	0,14
13	-1	0	0	19,11	0,18
14	0	0	0	19,48	0,50
15	1	0	0	19,93	0,18
16	-1	1	0	19,52	0,3
17	0	1	0	19,58	0,08
18	1	1	0	19,21	0,2
19	-1	-1	1	18,80	0,01
20	0	-1	1	19,03	0,19
21	1	-1	1	19,44	0,33
22	-1	0	1	18,49	0,07
23	0	0	1	18,71	0,21
24	1	0	1	19,21	0,09
25	-1	1	1	18,93	0,18
26	0	1	1	18,63	0,1
27	1	1	1	18,57	0,06

Através da análise da Tabela 4.2, nota-se que os experimentos 3 e 22 apresentaram o maior e o menor teor de umidade residual (22,18% e 18,49%), respectivamente. O experimento 3 é caracterizado pelo nível mais alto da força-g ($x_1 = 1$), pelo nível mais baixo de inclinação e concentração volumétrica ($x_2 = x_3 = -1$). Já o experimento 22 é caracterizado pelo nível mais baixo de força-g ($x_1 = -1$), pelo nível intermediário de inclinação ($x_2 = 0$) e pelo nível mais alto de concentração volumétrico ($x_3 = 1$).

Esse resultado indica que o aumento da força-g influencia o aumento do teor de umidade residual, enquanto que a concentração volumétrica influencia de maneira oposta, ou seja, o aumento dessa variável contribui para a diminuição do teor de umidade residual. Esse resultado é semelhante ao encontrado por Guerreiro (2015). Já o aumento da inclinação contribui para a diminuição do teor de umidade residual, entretanto, no experimento o menor valor desta resposta foi obtido com o nível intermediário desta variável. Isso pode ter ocorrido devido a dificuldades experimentais, sendo que nesse processo há a formação de conglomerados de sólidos aleatoriamente e juntamente com o efeito das demais variáveis influenciam no teor de umidade residual.

A partir dos resultados médios dispostos na Tabela 4.2 foram obtidos os parâmetros da Equação (4.2). Os valores dos coeficientes da regressão múltipla são apresentados na Equação (4.3), sendo que o coeficiente de correlação da regressão deste modelo é igual a 0,9820. Para o nível de confiabilidade de 95%, alguns dos parâmetros do modelo não possuem relevância estatística e podem ser excluídos. A partir da avaliação dos parâmetros que influenciam o modelo, nota-se que o parâmetro x_1^2 e as interações x_1x_3 e x_2x_3 não interferem significativamente no resultado da Equação (4.3). Deste modo, esta equação pode ser reescrita pela Equação (4.4) a qual possui um coeficiente de correlação da regressão de 0,9768.

$$U(\%) = 19,436 + 0,103x_1 - 0,228x_2 - 1,426x_3 + 0,118x_1^2 + 0,227x_2^2 + 0,628x_3^2 - 0,22x_1x_2 + 0,108x_1x_3 - 0,003x_2x_3 \quad (4.3)$$

$$U(\%) = 19,514 + 0,103x_1 - 0,228x_2 - 1,426x_3 + 0,227x_2^2 + 0,628x_3^2 - 0,22x_1x_2 \quad (4.4)$$

De acordo com o modelo representado pela Equação (4.4), nota-se que o aumento da força-g contribui para o aumento do teor de umidade, que o aumento da concentração volumétrica contribui para a diminuição do teor de umidade residual e o aumento da inclinação também contribui para a diminuição da resposta, como mencionado anteriormente.

A partir da Equação (4.4), pode-se construir as superfícies de resposta para o teor de umidade residual nos sólidos retidos em função das variáveis estudadas (força-g, inclinação da tela e concentração volumétrica). Na Figura 4.1 estão apresentadas as superfícies de resposta representada pela Equação (4.4). Cada superfície foi plotada no nível intermediário da variável que não à compõe.

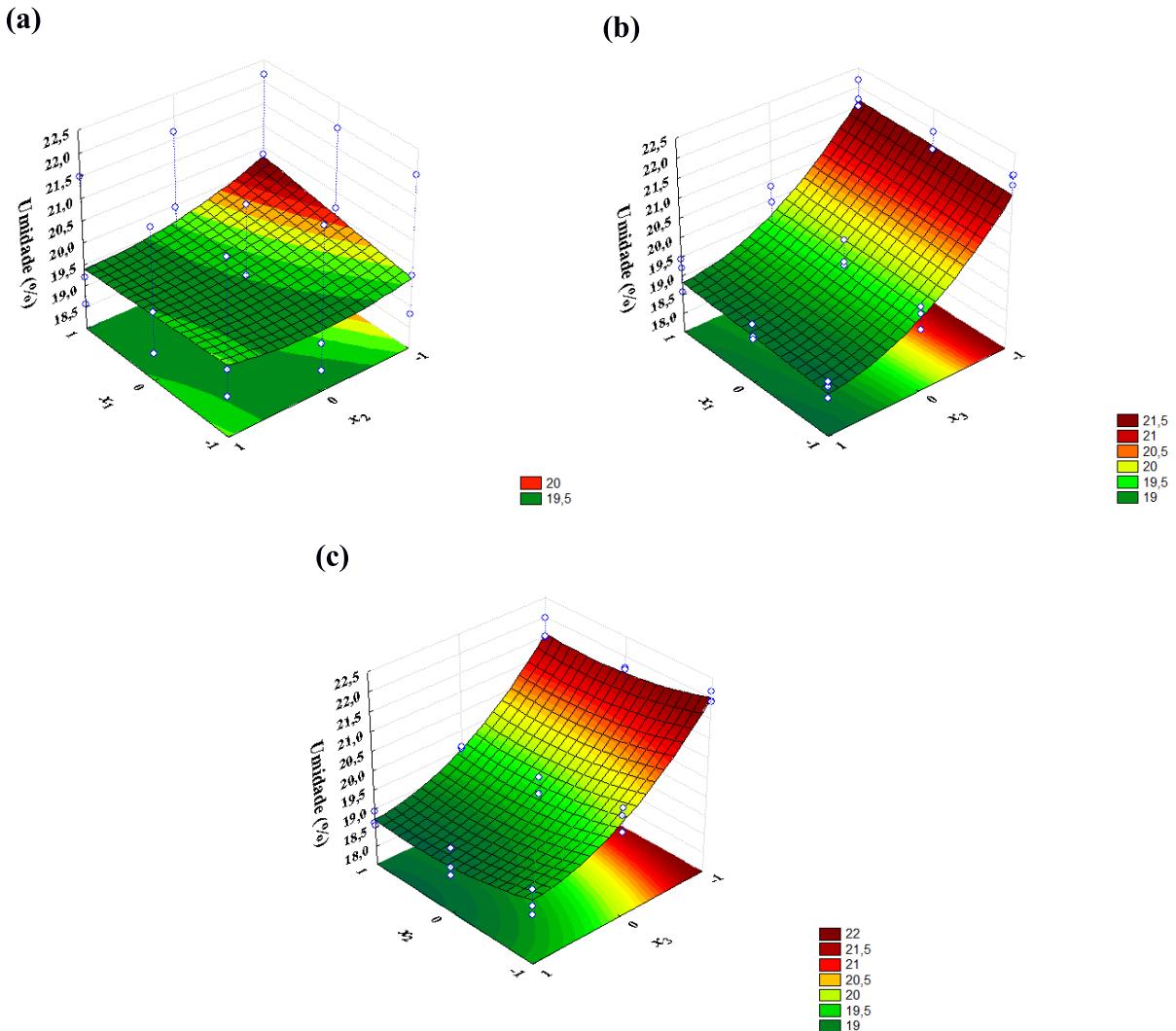


Figura 4.1: Superfície de resposta para o teor de umidade residual (sem vácuo).

Analizando as superfícies de resposta da Figura 4.1, em (a) nota-se que o aumento da força-g e a diminuição da inclinação contribui para o aumento do teor de umidade residual, enquanto que em (b) a concentração volumétrica apresenta influência maior sobre o teor de umidade residual em comparação com a força-g, e em (c) a concentração volumétrica apresenta maior influência sobre o teor de umidade residual em comparação com a inclinação. Sendo que em (b) e (c) a diminuição da concentração contribui para o aumento do teor de umidade residual.

4.1.2 PORCENTAGEM DE SÓLIDOS RETIDOS (SEM VÁCUO)

De posse dos resultados do teor de umidade residual coletados para o peneiramento vibratório convencional (sem vácuo) apresentado na secção anterior, pode-se utilizar a Equação

(2.8) e determinar a porcentagem de sólidos retidos no peneiramento. Na Tabela 4.3 estão apresentados os resultados da porcentagem de sólidos retidos no peneiramento vibratório de acordo com o planejamento experimental proposto.

Tabela 4.3: Resultados experimentais para a porcentagem de sólidos retidos sem vácuo.

EXP.	x_1	x_2	x_3	Porcentagem de sólidos retidos
1	-1	-1	-1	88,44
2	0	-1	-1	86,15
3	1	-1	-1	79,83
4	-1	0	-1	81,02
5	0	0	-1	79,17
6	1	0	-1	72,47
7	-1	1	-1	74,07
8	0	1	-1	72,23
9	1	1	-1	70,95
10	-1	-1	0	80,10
11	0	-1	0	77,62
12	1	-1	0	77,00
13	-1	0	0	76,78
14	0	0	0	74,47
15	1	0	0	70,50
16	-1	1	0	76,46
17	0	1	0	69,17
18	1	1	0	64,36
19	-1	-1	1	76,91
20	0	-1	1	76,28
21	1	-1	1	71,77
22	-1	0	1	75,80
23	0	0	1	71,00
24	1	0	1	68,09
25	-1	1	1	73,68
26	0	1	1	68,58
27	1	1	1	63,36

A partir da análise da Tabela 4.3, nota-se que os experimentos 1 e 27 apresentaram a maior e a menor porcentagem de sólidos retidos (88,44% e 63,36%), respectivamente. Esses experimentos são totalmente opostos em relação aos níveis das variáveis estudadas, ou seja, o experimento 1 é caracterizado pelos níveis mais baixos das variáveis ($x_1 = x_2 = x_3 = -1$), enquanto que o experimento 27 é caracterizado pelos níveis mais alto ($x_1 = x_2 = x_3 = 1$).

Esse resultado demonstra que a porcentagem de sólidos retidos é influenciada positivamente quando as variáveis estudadas estão no nível mais baixo e influenciada negativamente quando as variáveis estão no nível mais alto. Deste modo, o aumento das variáveis força-g, inclinação da tela e concentração de sólidos contribuem para a diminuição da

porcentagem de sólidos retidos. Esses resultados são condizentes com os obtidos por Fowler; Lim (1959), Guifeng; Xin (2011) e Guerreiro (2015).

Diante dos resultados apresentados na Tabela 4.3 foram determinados os parâmetros da Equação (4.2). A Equação (4.5) apresenta os valores dos coeficientes da regressão múltipla dos resultados. Essa regressão apresenta o coeficiente de correlação igual a 0,9495 para o modelo completo. Utilizando o *Statistica*, pode-se eliminar alguns parâmetros do modelo que não afetam significativamente o resultado para o nível de confiabilidade de 95%. Diante disto, os parâmetros x_1^2 , x_2^2 , x_3^2 e as interações x_1x_2 e x_1x_3 podem ser excluídos do modelo representado pela Equação (4.5). Deste modo, esta equação pode ser reescrita pela Equação (4.6) e possui um coeficiente de correlação da regressão de 0,9328.

$$E_R (\%) = 74,029 - 3,607x_1 - 4,513x_2 - 3,27x_3 - 0,431x_1^2 + 0,464x_2^2 + 0,938x_3^2 - 0,724x_1x_2 - 0,241x_1x_3 + 1,486x_2x_3 \quad (4.5)$$

$$E_R (\%) = 74,676 - 3,607x_1 - 4,513x_2 - 3,27x_3 + 1,486x_2x_3 \quad (4.6)$$

O modelo que representa a porcentagem de sólidos retidos apresentado na Equação (4.6), demonstra que o aumento das variáveis estudadas (força-g, inclinação e concentração volumétrica) contribuem para a diminuição da porcentagem de sólidos retidos. Entretanto, a interação inclinação e concentração volumétrica contribui para o aumento da resposta.

As superfícies de resposta que quantificam a porcentagem de sólidos retidos são apresentadas na Figura 4.2. Cada superfície foi construída no nível intermediário da variável que não à compõe.

Analizando as superfícies de resposta da Figura 4.2, é notório, em (a), (b) e (c), que a diminuição das variáveis força-g, inclinação e concentração volumétrica contribuem para o aumento da porcentagem de sólidos retidos. Percebe-se também que todas as variáveis afetam a resposta de maneira linear, entretanto, em (c) pode-se notar uma leve tendência de curvatura devido a interação da inclinação com a concentração volumétrica.

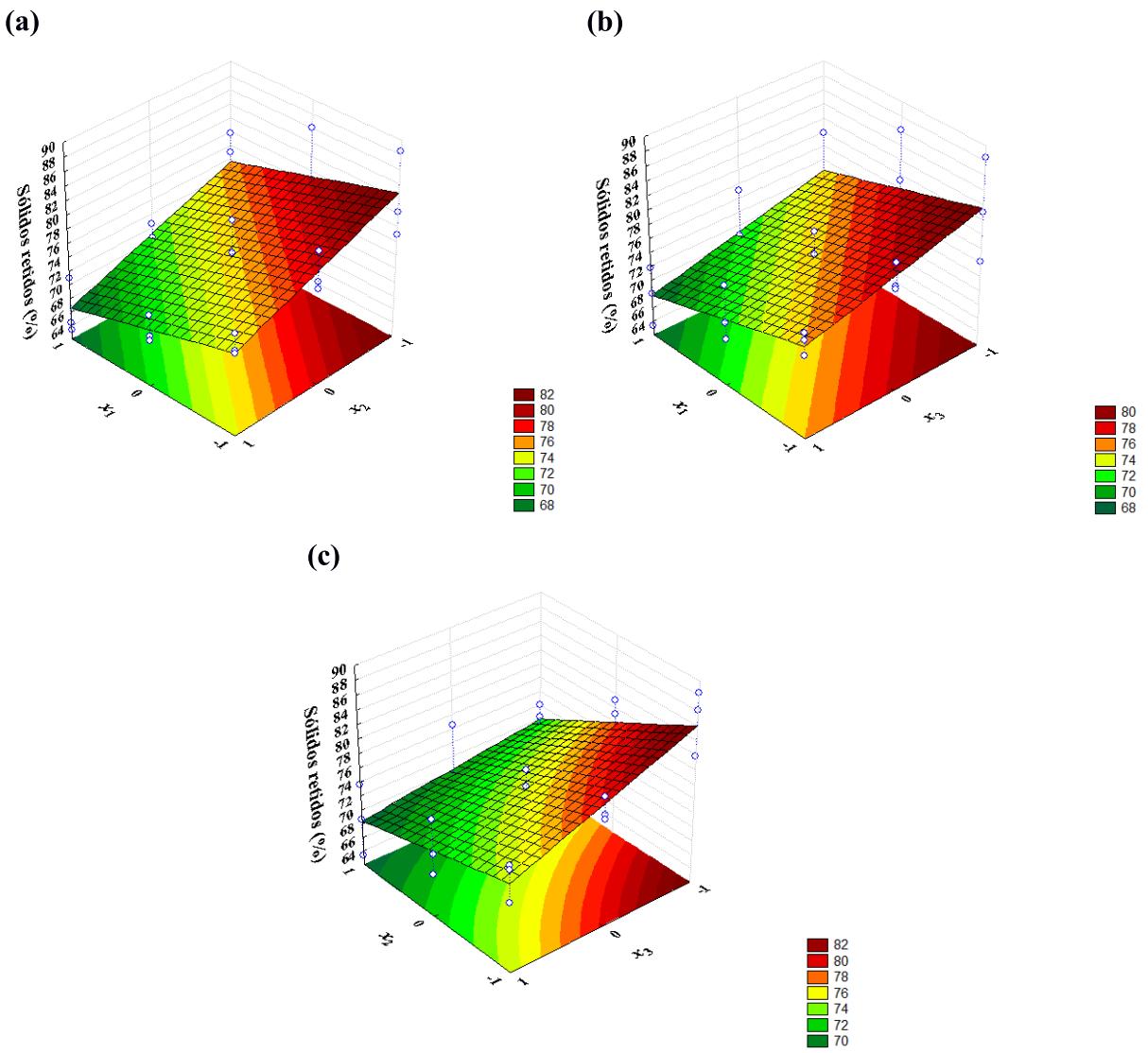


Figura 4.2: Superfície de resposta para a porcentagem de sólidos retidos (sem vácuo).

4.2 CONDIÇÃO B (PENEIRAMENTO COM VÁCUO)

Na realização destes experimentos foram coletadas amostras da suspensão para cada concentração volumétrica estudada a fim de monitorar a viscosidade dinâmica. Na Tabela 4.4 está apresentado o valor médio e o desvio padrão da viscosidade dinâmica da suspensão utilizada nos experimentos.

Tabela 4.4: Viscosidade dinâmica da suspensão nos experimentos com vácuo

Concentração Volumétrica de sólidos	Viscosidade (cP)	Desvio Padrão
2	5,20	0,97
4	4,86	0,49
6	4,23	0,29

Os resultados da Tabela 4.4, mostraram que houve uma pequena variação da viscosidade entre os experimentos com concentrações volumétrica diferentes, mas o desvio padrão demonstra que os valores são próximos.

4.2.1 TEOR DE UMIDADE RESIDUAL (COM VÁCUO)

Todos os resultados do teor de umidade residual coletados para o peneiramento vibratório alternativo (com vácuo) estão apresentados no Apêndice A. Os resultados selecionados para analisar o teor de umidade residual nesta seção são referentes aos valores médios das amostras coletadas juntamente com os desvios padrão. Na Tabela 4.5 estão apresentados as médias e os desvios padrão do teor de umidade residual obtido em triplicata de acordo com o planejamento experimental proposto.

Tabela 4.5: Resultados experimentais para o teor de umidade residual com vácuo.

EXP.	x_1	x_2	x_3	Teor de umidade residual	Desvio Padrão
1	-1	-1	-1	20,23	0,16
2	0	-1	-1	20,60	0,22
3	1	-1	-1	20,75	0,48
4	-1	0	-1	19,25	0,17
5	0	0	-1	19,56	0,23
6	1	0	-1	19,71	0,43
7	-1	1	-1	19,48	0,13
8	0	1	-1	19,50	0,06
9	1	1	-1	19,68	0,26
10	-1	-1	0	19,24	0,53
11	0	-1	0	19,43	0,48
12	1	-1	0	19,59	0,26
13	-1	0	0	18,97	0,43
14	0	0	0	19,11	0,20
15	1	0	0	19,24	0,24
16	-1	1	0	19,03	0,45
17	0	1	0	18,71	0,14
18	1	1	0	19,04	0,05
19	-1	-1	1	18,44	0,11
20	0	-1	1	18,85	0,03
21	1	-1	1	19,40	0,26
22	-1	0	1	17,99	0,33
23	0	0	1	18,69	0,23
24	1	0	1	18,94	0,29
25	-1	1	1	17,97	0,27
26	0	1	1	18,48	0,36
27	1	1	1	19,01	0,14

Na análise da Tabela 4.5, nota-se que os experimentos 3 e 25 apresentaram o maior e o menor teor de umidade residual (20,75% e 17,97%), respectivamente. O experimento 3 é caracterizado pelo nível mais alto da força-g ($x_1 = 1$) e pelos níveis mais baixos de inclinação e concentração volumétrica ($x_2 = x_3 = -1$). Já o experimento 25 é caracterizado pelo nível mais baixo de força-g ($x_1 = -1$) e os níveis mais alto da inclinação e da concentração volumétrica ($x_2 = x_3 = 1$).

Assim como nos experimentos sem vácuo, esse resultado indica que o aumento da força-g influencia para o aumento do teor de umidade residual, o aumento da concentração volumétrica fornece um material retido mais seco e o aumento da inclinação contribui para diminuição do teor de umidade residual. Guerreiro (2015) estudou a influência da força-g e da concentração volumétrica, tendo observado a mesma tendência.

Os resultados da Tabela 4.5 também mostraram que o vácuo contribuiu para obtenção de uma material retido mais seco em comparação com os sólidos retidos obtidos no experimento sem vácuo. Esse resultado é favorável para obtenção de sólidos menos úmidos permitindo uma melhor recuperação do fluido de perfuração e a adequação dos sólidos a legislação ambiental vigente.

A partir dos resultados médios dispostos na Tabela 4.5 foram obtidos os parâmetros da Equação (4.2). Na Equação (4.7) estão apresentados os valores dos coeficientes da regressão múltipla, no qual o coeficiente de correlação da regressão deste modelo é igual a 0,9407. Para o nível de confiabilidade de 95%, alguns dos parâmetros do modelo não possuem relevância estatística e podem ser excluídos do modelo. A partir da avaliação dos parâmetros que influenciam o modelo, nota-se que o parâmetro x_1^2 e x_3^2 e a interação x_1x_2 não interferem significativamente no resultado da Equação (4.7). Deste modo, a Equação (4.7) pode ser reescrita pela Equação (4.8) e possui um coeficiente de correlação da regressão de 0,9329.

$$U(\%) = 18,98 + 0,264x_1 - 0,313x_2 - 0,611x_3 + 0,006x_1^2 + 0,251x_2^2 + 0,101x_3^2 - 0,048x_1x_2 + 0,148x_1x_3 + 0,141x_2x_3 \quad (4.7)$$

$$U(\%) = 19,05 + 0,264x_1 - 0,313x_2 - 0,611x_3 + 0,251x_2^2 + 0,148x_1x_3 + 0,141x_2x_3 \quad (4.8)$$

A partir do modelo representado pela Equação (4.8), pode-se notar que o aumento da força-g contribui para o aumento do teor de umidade, enquanto que o aumento da concentração volumétrica e da inclinação contribuem para a diminuição do teor de umidade residual, como mencionado anteriormente. Esse resultado também foi observado na Seção 4.1.1.

A partir da Equação (4.8), pode-se construir as superfícies de resposta. Na Figura 4.3 estão apresentadas as superfícies de resposta obtidas pela Equação 4.8. Cada superfície foi construída no nível intermediário da variável que não à compõe.

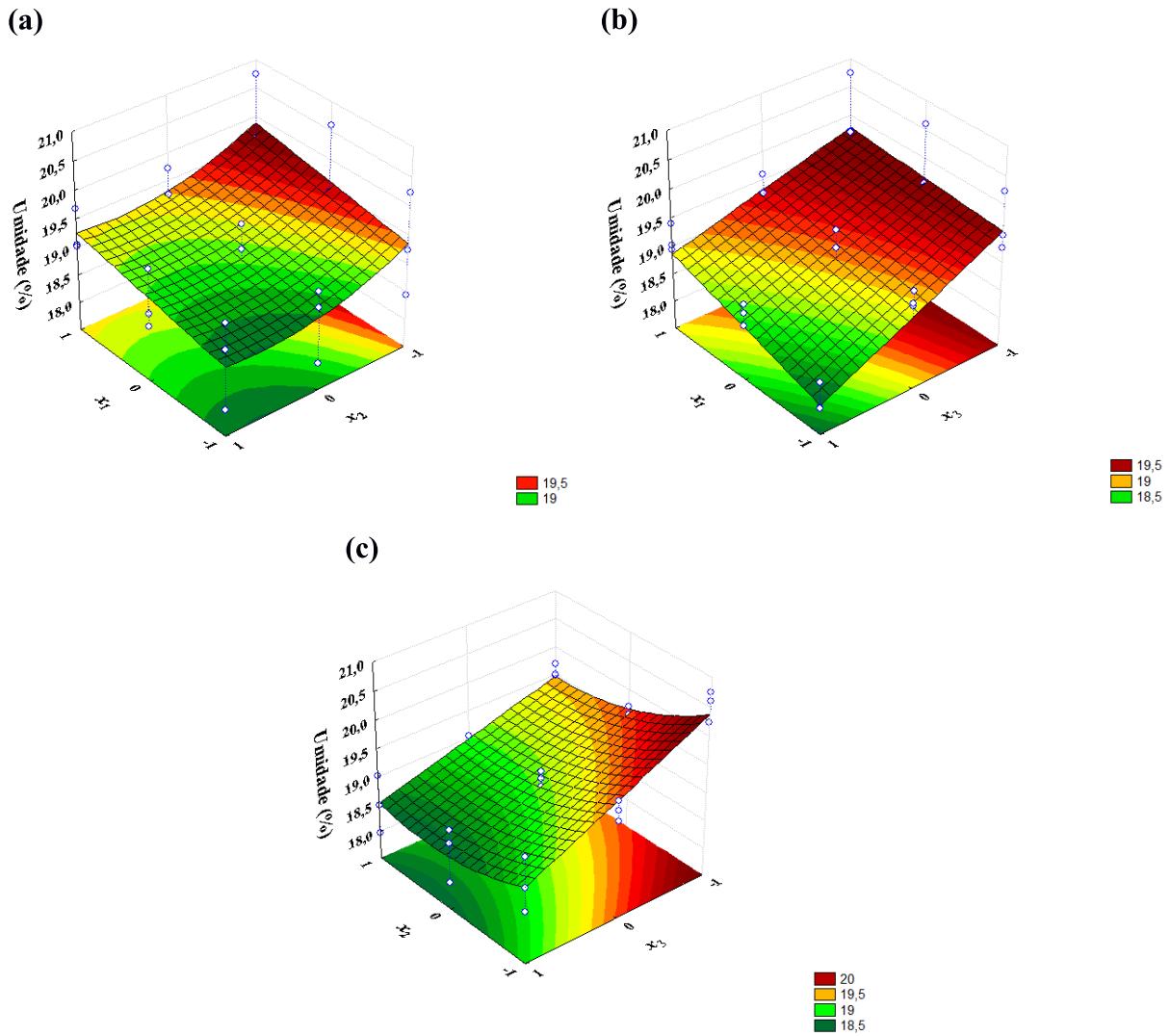


Figura 4.3: Superfície de resposta para o teor de umidade residual (com vácuo).

Através da análise das superfícies de resposta da Figura 4.3, nota-se que em (a) o aumento da força-g e a diminuição da inclinação contribuiu para o aumento do teor de umidade residual, resultado semelhante ao observado na Seção 4.1.1, já em (b) o aumento da força-g e a diminuição da concentração volumétrica contribuiu para o aumento do teor de umidade residual no sólidos retidos, enquanto que em (c) a diminuição da concentração volumétrica e o aumento da inclinação também contribuiu para o aumento do teor de umidade residual.

4.2.2 PORCENTAGEM DE SÓLIDOS RETIDOS (COM VÁCUO)

Para determinar a porcentagem de sólidos retidos no peneiramento alternativo (com vácuo) é necessário utilizar os resultados do teor de umidade residual da seção anterior para determinar a fração de sólidos na corrente de retido e utilizar a Equação (2.8). Na Tabela 4.6 estão apresentados os resultados da porcentagem de sólidos retidos no peneiramento vibratório sob vácuo de acordo com o planejamento experimental proposto.

Tabela 4.6: Resultados experimentais para a porcentagem de sólidos retidos com vácuo.

EXP.	x_1	x_2	x_3	Porcentagem de sólidos retidos
1	-1	-1	-1	90,57
2	0	-1	-1	86,81
3	1	-1	-1	86,77
4	-1	0	-1	81,30
5	0	0	-1	81,70
6	1	0	-1	74,15
7	-1	1	-1	76,54
8	0	1	-1	77,57
9	1	1	-1	70,10
10	-1	-1	0	80,17
11	0	-1	0	77,57
12	1	-1	0	76,98
13	-1	0	0	77,10
14	0	0	0	72,87
15	1	0	0	71,25
16	-1	1	0	76,75
17	0	1	0	72,43
18	1	1	0	66,18
19	-1	-1	1	79,67
20	0	-1	1	76,69
21	1	-1	1	72,28
22	-1	0	1	76,50
23	0	0	1	73,15
24	1	0	1	69,40
25	-1	1	1	75,89
26	0	1	1	69,51
27	1	1	1	65,67

A partir da análise da Tabela 4.6, semelhante ao observado na seção da porcentagem de sólidos retidos do peneiramento vibratório sem vácuo, nota-se que os experimentos 1 e 27 apresentaram a maior e a menor porcentagem de sólidos retidos (90,57% e 65,67%), respectivamente. O experimento 1 é caracterizado pelos níveis mais baixos das variáveis ($x_1 = x_2 = x_3 = -1$), enquanto o inverso ocorre com o experimento 27.

Esse fato indica que o aumento das variáveis força-g, inclinação da tela e concentração volumétrica contribuem para a diminuição da porcentagem de sólidos retidos. Assim como os resultados da Seção 4.1.2, esses resultados são condizentes com os obtidos por Fowler; Lim (1959) para inclinações descendentes com maiores vibrações, Guifeng; Xin (2011) no peneiramento vibratório DEM para inclinações descendentes e Guerreiro (2015) para força-g e concentração volumétrica.

Os resultados apresentados na Tabela 4.6 foram utilizados na regressão múltipla, a fim de obter o modelo que forneça a porcentagem de sólidos retidos representado pela Equação (4.9).

Esse modelo apresenta o coeficiente de correlação igual a 0,9491. Mas a resposta desta seção pode ser representada pelo modelo simplificado, a partir da eliminação das variáveis que não afetam significativamente o resultado para o nível de confiabilidade de 95%. Diante disto, os parâmetros x_1^2 , x_2^2 e as interações x_1x_2 e x_1x_3 podem ser excluídos do modelo representado pela Equação (4.9). Deste modo, a Equação (4.9) pode ser reescrita pela Equação (4.10) e possui um coeficiente de correlação da regressão de 0,9173.

$$E_R (\%) = 74.071 - 3,428x_1 - 4,271x_2 - 3,708x_3 - 0,518x_1^2 + 1,295x_2^2 + 2,315x_3^2 - 1,071x_1x_2 - 0,61x_1x_3 + 1,864x_2x_3 \quad (4.9)$$

$$E_R (\%) = 74,589 - 3,428x_1 - 4,271x_2 - 3,708x_3 + 2,315x_3^2 + 1,864x_2x_3 \quad (4.10)$$

Pode-se perceber, ao analisar a Equação (4.10), que as variáveis que afetam a porcentagem de sólidos retidos são a força-g, a inclinação, a concentração volumétrica linear e quadrática e a interação entre a inclinação e a concentração volumétrica. Deste modo, o aumento das variáveis lineares contribuem para a diminuição da resposta, enquanto que a concentração volumétrica quadrática e a interação da inclinação com a concentração volumétrica influenciam para o aumento da resposta.

As superfícies de resposta que representam a porcentagem de sólidos retidos são apresentadas na Figura 4.4 e foi construída de posse da Equação (4.10). Cada superfície foi construída no nível intermediário da variável que não à compõe.

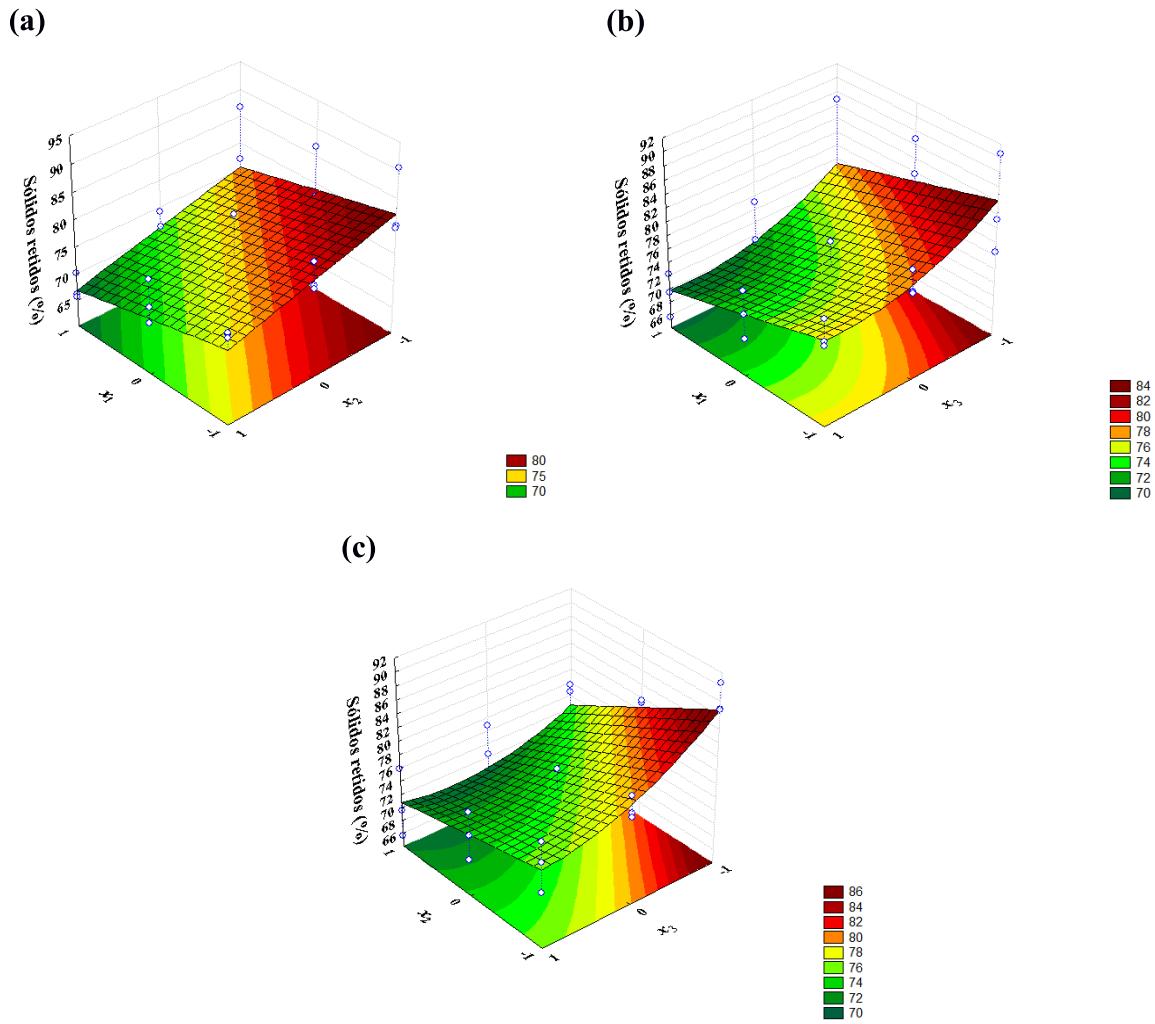


Figura 4.4: Superfície de resposta para a porcentagem de sólidos retidos (com vácuo).

Na análise das superfícies de resposta da Figura 4.4, nota-se que em (a) a diminuição da força-g e da inclinação contribuiu para o aumento da porcentagem de sólidos retidos, resultado semelhante ao observado na Seção 4.1.2, já em (b) a diminuição da força-g e da concentração volumétrica contribuiu para o aumento da resposta, entretanto, percebe-se uma leve concavidade desta superfície devido ao efeito da concentração volumétrica quadrática, enquanto que em (c) a diminuição da inclinação e da concentração volumétrica também contribuiu para o aumento da porcentagem de sólidos retidos, e esta superfície também apresenta a influência da interação entre essas variáveis.

4.2.3 PORCENTAGEM DE ÁREA OCUPADA PELO LÍQUIDO

Essa seção tem o objetivo de observar a influência do vácuo em relação a diminuição da porcentagem de área ocupada pelo líquido. A diminuição desta resposta é importante na

unidade de tratamento de sólidos tendo em vista o aumento da capacidade operacional da peneira vibratória. Devido as dificuldades experimentais, a fase fluida não atingiu a área de aplicação do vácuo, que era situado na última seção da peneira (próximo a saída de retidos), de modo que o vácuo não influenciou nesta resposta.

Entretanto, a porcentagem de área ocupada pelo líquido foi estudada para permitir a compreensão da influência das variáveis força-g, inclinação da tela e concentração de sólidos retidos sobre essa resposta.

A partir da análise de três fomes do vídeo de cada experimento do planejamento experimental proposto e a utilização da Equação (3.3) foi possível quantificar a porcentagem de área ocupada pelo líquido (porcentagem de área molhada). Na Tabela 4.7 estão apresentados os resultados para esta resposta. Nesta seção são apresentados os valores médios com os desvios padrão. A Tabela completa está apresentada no Apêndice A.

Tabela 4.7: Resultados experimentais para a porcentagem de área ocupada pelo líquido.

EXP.	x_1	x_2	x_3	Porcentagem de área molhada	Desvio Padrão
1	-1	-1	-1	50,84	0,37
2	0	-1	-1	47,62	1,67
3	1	-1	-1	47,85	0,53
4	-1	0	-1	50,03	0,11
5	0	0	-1	45,04	0,25
6	1	0	-1	47,01	0,30
7	-1	1	-1	47,38	0,68
8	0	1	-1	45,25	0,62
9	1	1	-1	45,24	0,66
10	-1	-1	0	38,16	1,05
11	0	-1	0	35,97	0,58
12	1	-1	0	36,14	0,83
13	-1	0	0	40,43	1,24
14	0	0	0	35,92	0,25
15	1	0	0	33,13	0,34
16	-1	1	0	40,16	0,57
17	0	1	0	36,19	0,65
18	1	1	0	35,51	0,41
19	-1	-1	1	37,74	0,96
20	0	-1	1	33,52	0,82
21	1	-1	1	31,51	0,22
22	-1	0	1	34,73	0,26
23	0	0	1	31,89	0,27
24	1	0	1	29,54	0,50
25	-1	1	1	36,13	1,84
26	0	1	1	32,05	0,45
27	1	1	1	26,82	1,20

Através da análise da Tabela 4.7, nota-se que os experimentos 1 e 27 apresentaram a maior e a menor porcentagem de área ocupada pelo líquido (50,84% e 26,82%), respectivamente. O experimento 1 é caracterizado pelos níveis mais baixos da força-g, da inclinação e da concentração ($x_1 = x_2 = x_3 = -1$), enquanto que o experimento 27 é caracterizado pelos níveis mais altos da força-g, da inclinação e da concentração volumétrica ($x_1 = x_2 = x_3 = 1$).

Esse resultado indica que o aumento da porcentagem de área ocupada pelo líquido é influenciada pela diminuição das variáveis força-g, inclinação da tela e concentração volumétrica. E, de maneira oposta, a diminuição da porcentagem de área ocupada pelo líquido é obtida com o nível mais altos destas variáveis. Esse resultado é semelhante aos encontrados por Hoberock (1980) que relacionou a inclinação descendente da tela com a área molhada e por Raja *et al.* (2010) que observaram a diminuição do comprimento de tela molhada e o aumento da capacidade com o aumento da inclinação.

A partir dos resultados médios dispostos na Tabela 4.7 foram obtidos os parâmetros da Equação (4.2). A Equação (4.11) apresenta os valores dos coeficientes da regressão múltipla. O coeficiente de correlação da regressão deste modelo é igual a 0,9769. A partir da avaliação dos parâmetros que influenciam o modelo para o nível de confiabilidade de 95%, nota-se que o parâmetro x_2^2 e as interações x_1x_2 e x_2x_3 não interferem significativamente no resultado da Equação (4.11) proporcionando um coeficiente de correlação de 0,9741. Deste modo, a Equação (4.11) pode ser reescrita pela Equação (4.12).

$$A_M (\%) = 35,731 - 2,381x_1 - 0,812x_2 - 7,352x_3 + 1,192x_1^2 + 0,48x_2^2 + 3,165x_3^2 - 0,405x_1x_2 - 1,048x_1x_3 + 0,056x_2x_3 \quad (4.11)$$

$$A_M (\%) = 36,051 - 2,381x_1 - 0,812x_2 - 7,352x_3 + 1,192x_1^2 + 3,165x_3^2 - 1,048x_1x_3 \quad (4.12)$$

De acordo com o modelo representado pela Equação (4.12), percebe-se que o aumento da força-g, da inclinação e da concentração e a interação entre a força-g e a concentração volumétrica contribuem para a diminuição da porcentagem de área ocupada pelo líquido, enquanto que a inclinação quadrática e a concentração volumétrica quadrática contribuem para o aumento desta resposta.

A partir da Equação (4.12), pode-se construir as superfícies de resposta da porcentagem de área ocupada pelo líquido em função das variáveis estudadas (força-g,

inclinação da tela e concentração volumétrica). Na Figura 4.5 são apresentadas as superfícies de resposta geradas pela Equação (4.12). Cada superfície foi construída no nível intermediário da variável que não à compõe.

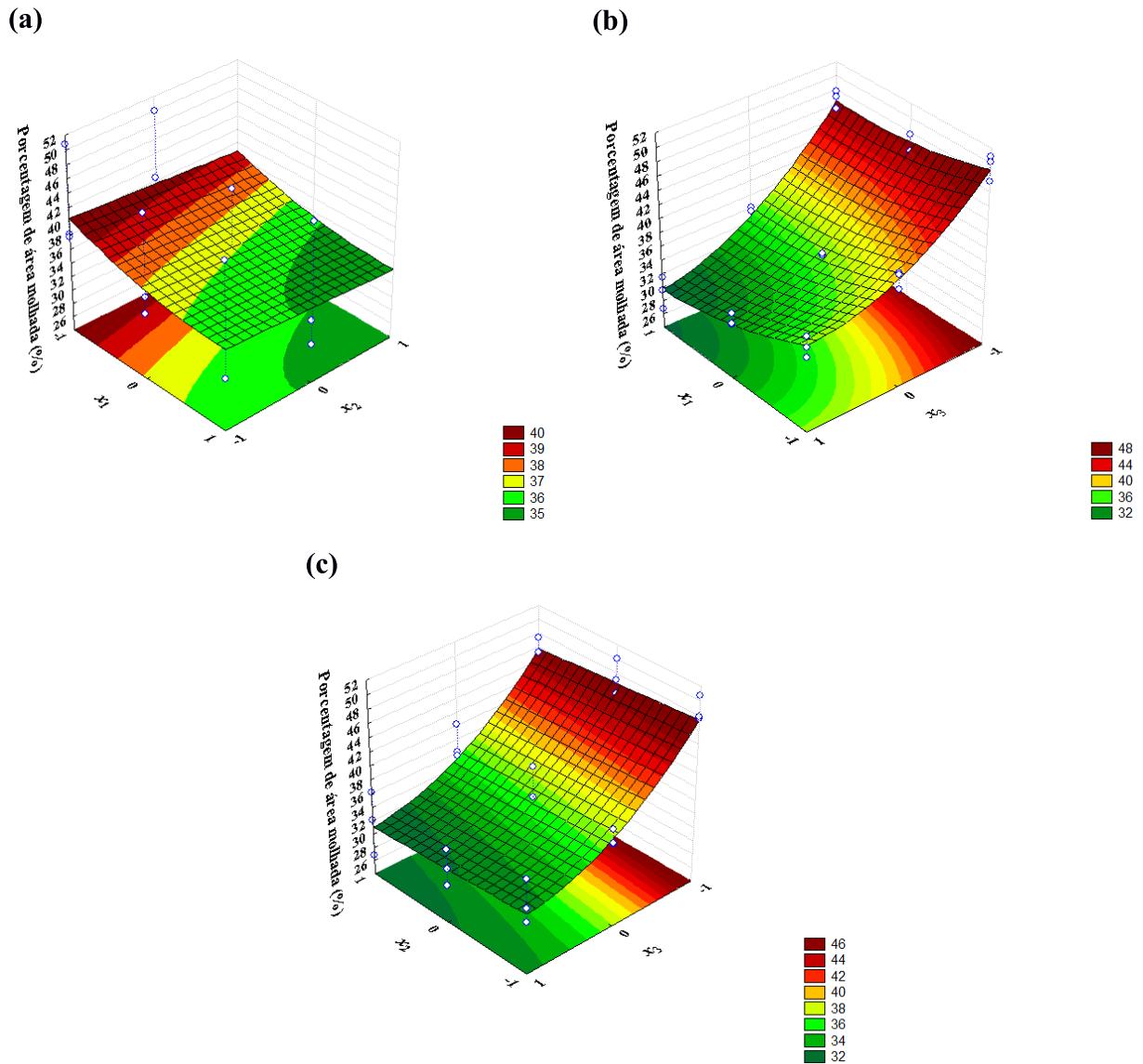


Figura 4.5: Superfície de resposta para a porcentagem de área ocupada pelo líquido (com vácuo).

Na análise das superfícies de resposta da Figura 4.5, nota-se que em (a) a diminuição de ambas as variáveis influenciam no aumento da resposta, já em (b) a concentração volumétrica apresenta maior influência que a força-g, de modo que a diminuição destas variáveis contribuem para o aumento da porcentagem de área ocupada pelo líquido, enquanto que em (c) a concentração volumétrica apresenta maior influência que a inclinação e da mesma

forma que no item anterior a diminuição destas variáveis proporcionam o aumento da porcentagem de área ocupada pelo líquido.

A influência da força-g na diminuição desta resposta pode ter ocorrido porque o aumento desta variável força a passagem do líquido pela tela de peneiramento. Já o aumento da concentração de sólidos favorece a formação de uma barreira de sólidos impedindo o avanço do líquido sobre a tela de peneiramento, mas ocorre também o aumento da altura de líquido na vertical e esse fato pode ter favorecido a diminuição da porcentagem de área ocupada pelo líquido. E, o aumento na inclinação da tela proporciona o recuo do líquido sobre a tela e, por conseguinte, a diminuição da porcentagem de área ocupada pelo líquido.

4.2.4 PONTO ÓTIMO

A condição operacional que representa o ponto ótimo da função objetivo apresentada na Equação 3.4 foi obtida com a utilização do solver do *software Excel* (demonstrado no Apêndice C). Essa condição ótima de operação contempla o menor teor de umidade residual com a maior porcentagem de sólidos retidos e com a menor porcentagem de área ocupada pelo líquido dentro da região experimental estudada.

O ponto ótimo de operação foi obtido em $x_1 = -1$, $x_2 = -0,45$ e $x_3 = 1$, ou seja, força-g de intensidade de 3,0, inclinação da tela de $0,825^\circ$ e concentração volumétrica de 6,0%. Esse ponto operacional obteve o teor de umidade de 18,08%, a porcentagem de sólidos retidos de 77,70% e porcentagem de área ocupada de 36,85%.

Deste modo, percebe-se que a força-g mais branda com a tela da peneira levemente inclina e alta concentração volumétrica obteve a melhor condição operacional dentro do intervalo estudado.

4.3 COMPARAÇÃO ENTRE AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS ESTUDADAS

Essa seção é dedicada a comparação das respostas obtidas entre o peneiramento convencional (sem vácuo) e o peneiramento alternativo (com vácuo). Deste modo, foi possível avaliar a influência da aplicação de vácuo no peneiramento vibratório.

4.3.1 TEOR DE UMIDADE RESIDUAL

De posse das Tabelas 4.2 e 4.5 apresentadas nas seções anteriores, foi possível apresentar os resultados do teor de umidade residual entre os dois peneiramentos estudados. Na Figura 4.6 estão apresentados os valores médios da resposta estudada com os desvios padrão.

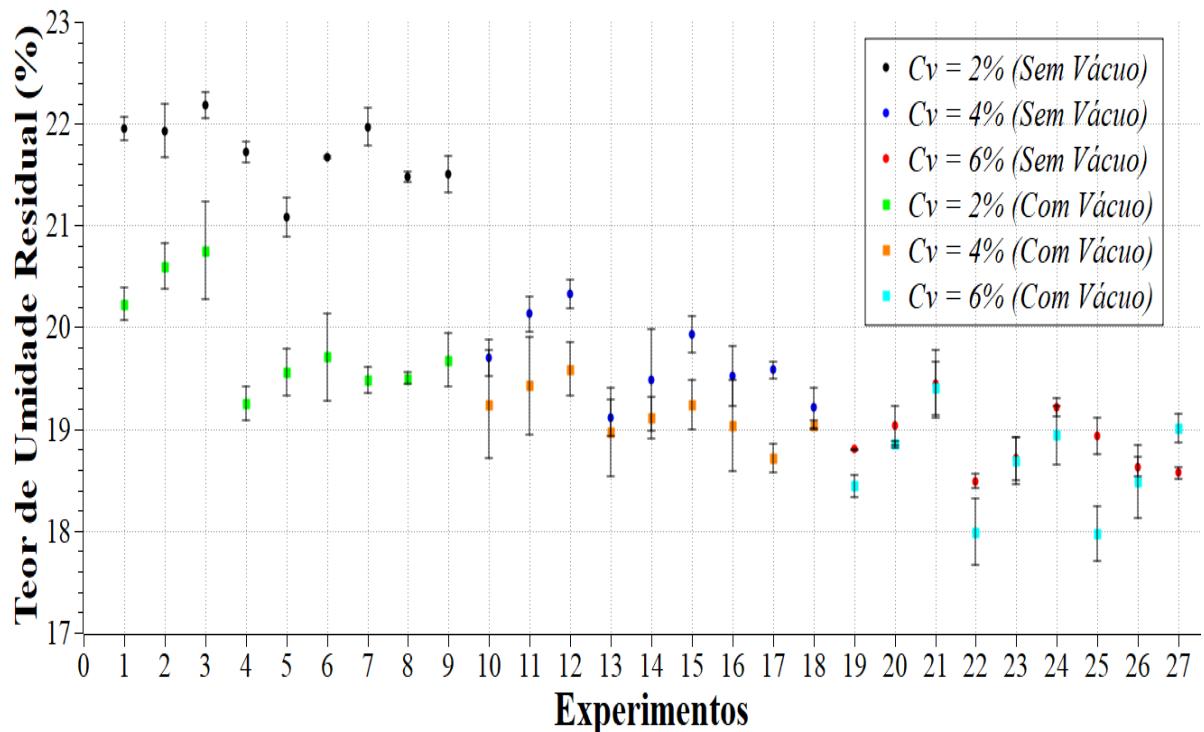


Figura 4.6: Resultados dos peneiramentos para o teor de umidade residual.

A partir da Figura 4.6, nota-se que a aplicação do vácuo proporcionou uma redução do teor de umidade residual para os experimentos que apresentam concentração volumétrica de 2,0%. Para as outras duas concentrações é perceptível que ambas não sofreram a influência da aplicação de vácuo para a resposta desta seção.

Esse resultado foi obtido em consequência das limitações da bomba de vácuo utilizada que fornecia um vácuo de 1,5 inHg. Durante o peneiramento, os sólidos formavam-se uns conglomerados independentes e estes não ocupavam toda a área de peneiramento, deixando muitos espaços vazios na tela. Esse fato pode ter influenciado no baixo valor do vácuo, pois se os sólidos ocupassem toda a área de peneiramento iria ocorrer o tamponamento ajudando na obtenção de um vácuo mais vigoroso. Entretanto, esse resultado mostra que a aplicação de vácuo na região de secagem da peneira contribuiu para a diminuição do teor de umidade residual dos sólidos retidos possibilitando a utilização deste sistema em peneiras industriais e

auxiliando na recuperação do fluido de perfuração e na adequação dos sólidos retidos a legislação ambiental.

De acordo com os resultados do teor de umidade residual obtidos nos dois peneiramentos, pode-se perceber a influência das variáveis estudadas. Neste sentido, o aumento da força-g influencia de maneira negativa nesta resposta, ou seja, o aumento desta variável fornece sólidos retidos mais úmidos. Entretanto, para maiores concentrações de sólidos esta variável apresenta menor influência. O fato do aumento da força-g favorecer o aumento da resposta, ocorre porque essa variável é responsável pelo transporte dos sólidos sobre a tela da peneira propiciando um menor tempo de residência dos sólidos. Esse resultado são concordantes com os obtidos por Guerreiro (2015), Freitas (2017) e Barbosa *et al.* (2017).

Já o aumento da concentração volumétrica de sólidos contribui para a diminuição da resposta. Durante a realização dos experimentos, notou-se que a concentração de sólidos interfere na área ocupada e no tamanho dos conglomerados de sólidos formados. Por conseguinte, uma concentração menor de sólidos na alimentação fornece menos sólidos distribuídos sobre a tela da peneira proporcionando um aumento no teor de umidade residual. Por outro lado, para uma concentração maior, há mais sólidos distribuídos ao longo da tela proporcionando uma melhor secagem deste sólidos. O aumento da concentração de sólidos também pode aumentar o atrito favorecendo a secagem.

E, por fim, o aumento da inclinação favoreceu para a obtenção de sólidos retidos menos úmidos, porque esta variável influenciou no aumento da região de secagem da peneira ao diminuir a área ocupada pelo líquido, ou seja, com o aumento da inclinação, os sólidos são transportados por uma distância maior de secagem em comparação com baixas inclinações que permite o avanço do líquido sobre a tela. Esse resultado, do aumento da região de secagem, é condizente aos encontrados por Hoberock (1980), Raja *et al.* (2010) e Barbosa *et al.* (2017).

4.3.2 PORCENTAGEM DE SÓLIDOS RETIDOS

A partir das Tabelas 4.3 e 4.6 apresentadas nas seções anteriores, foi possível plotar os resultados da porcentagem de sólidos retidos nos dois peneiramentos estudados que estão apresentados na Figura 4.7.

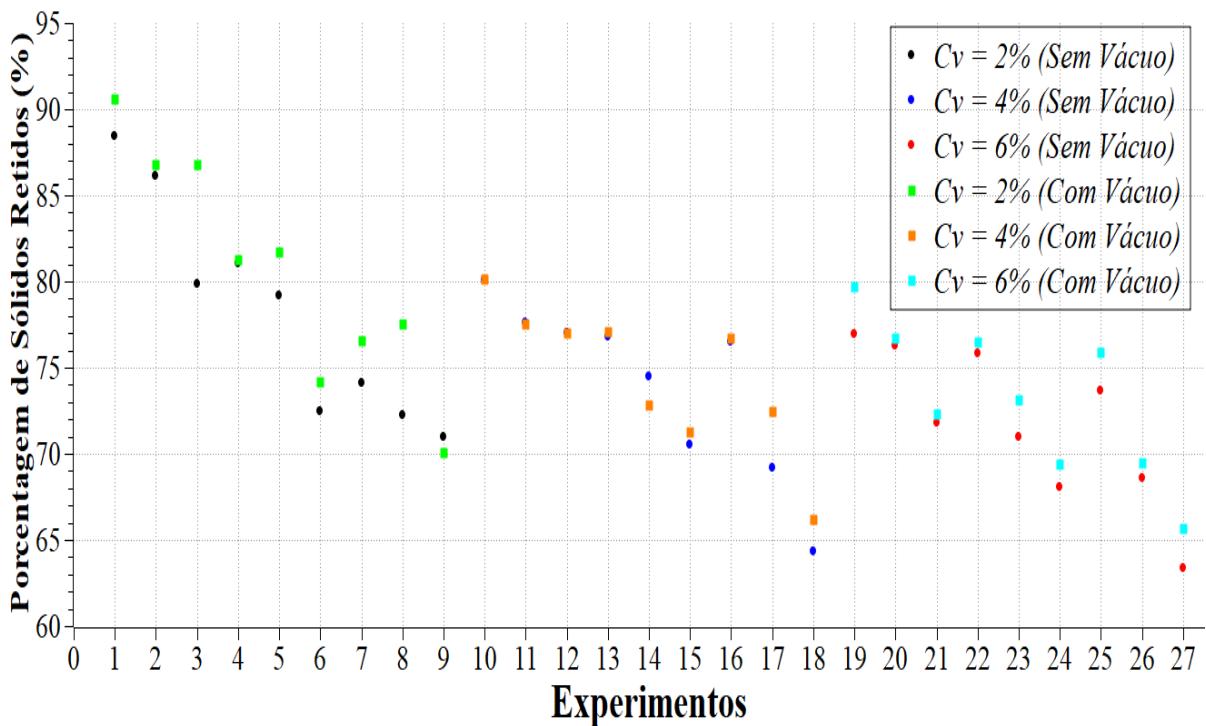


Figura 4.7: Resultados dos peneiramentos para a porcentagem de sólidos retidos

Na análise da Figura 4.7, nota-se que os valores da resposta obtidos para os dois peneiramentos estão próximos. Nesse sentido, não houve influência da aplicação de vácuo na porcentagem de sólidos retidos. Pode não ter ocorrido diferença porque o tempo de execução do experimento foi curto e apresentaram vazão de retidos muito próximos. Entretanto, nota-se a influência das variáveis operacionais estudadas nesta resposta.

Desta maneira, percebe-se que o aumento da força-g proporciona uma menor porcentagem de sólidos retidos. Esse resultado foi obtido porque o aumento desta variável favoreceu o aumento da probabilidade de passagem dos sólidos pela abertura da tela devido a maior magnitude do choque entre a partícula e a abertura da tela, como também contribuiu para desobstrução da abertura da tela por partículas que ficam presas nelas. Guerreiro (2015) obteve resultado semelhante para a eficiência granulométrica.

O aumento da concentração de sólidos na alimentação contribuiu para a diminuição da porcentagem de sólidos retidos. Esse fato ocorreu porque o aumento da concentração forneceu mais sólidos sobre a tela da peneira e a formação de conglomerados maiores que apresentaram maior pressão dos sólidos sobre a tela favorecendo a passagem. Esse resultado foi semelhante ao encontrado por Guerreiro (2015).

O aumento da inclinação da tela de peneiramento também contribuiu para a diminuição da porcentagem de sólidos retidos. Esse resultado foi condizente aos encontrados por Fowler e Lim (1959) e Guifeng e Xin (2011).

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO E SUGESTÕES

5.1 CONCLUSÃO

A realização deste trabalho proporcionou avaliar o comportamento, em estado estacionário, da peneira vibratória operando com aplicação de vácuo. De acordo com o planejamento experimental 3^k , que consistiu de 27 experimentos, realizou-se os experimentos no protótipo de peneira vibratória visando obter os modelos que relacionam as respostas teor de umidade dos sólidos retidos, porcentagem de sólidos retidos e porcentagem de área ocupada pelo líquido com as variáveis operacionais estudadas força-g, inclinação da tela e concentração de sólidos na alimentação. Durante a realização dos experimentos, o protótipo se mostrou eficiente para o estudo proposto e houve reproduzibilidade dos resultados obtidos.

Foi avaliado o comportamento do peneiramento vibratório convencional, sem a aplicação de vácuo, a partir do planejamento experimental proposto para a obtenção dos modelos para o teor de umidade residual e porcentagem de sólidos retidos relacionando-os com as variáveis operacionais.

Os resultados de ambos os peneiramentos (com vácuo e sem vácuo) indicaram forte influência da concentração dos sólidos da alimentação no teor de umidade dos sólidos retidos. O aumento da concentração favorece a diminuição da umidade e esse fato foi relacionado com a quantidade de material aglomerado sobre a tela. De maneira oposta, o aumento da força-g proporcionou um acréscimo do teor de umidade dos sólidos retidos, sendo que esta variável influencia menos quando o peneiramento vibratório ocorre com maior concentração de sólidos. Já o aumento da inclinação ascendente da tela favoreceu a diminuição do teor de umidade residual.

Na realização dos experimentos, notou-se a influência do vácuo na diminuição do teor de umidade residual dos sólidos retidos. Porém, esse resultado foi mais significativo para os experimentos que apresentam a menor concentração de sólidos no intervalo estudado. Esse fato ocorreu devido as dificuldades de preenchimento da tela pelos sólidos e ao baixo valor do vácuo fornecido pela bomba de vácuo. Já os resultados da porcentagem de sólidos retidos não sofreram influência do sistema de vácuo proposto neste estudo.

Os resultados de ambos os peneiramentos para a porcentagem de sólidos retidos sofreram a influência das variáveis estudadas. Percebeu-se que os melhores resultados obtidos

para esta resposta foram de 90,57% para o peneiramento operando sob vácuo e de 88,44% no peneiramento convencional. Esse resultado foi obtido nos experimentos que as variáveis codificadas apresentavam o nível mais baixo ($x_1 = x_2 = x_3 = -1$). Enquanto que os resultados com as menores porcentagem de sólidos retidos foram obtidos no nível mais alto das variáveis codificadas ($x_1 = x_2 = x_3 = 1$), sendo 65,67% para o peneiramento sob vácuo e 63,36% para o peneiramento convencional.

A porcentagem de área ocupada pelo líquido (área molhada) foi estudada apenas no peneiramento operando com vácuo, pois pretendia avaliar a diminuição desta área devido ao vácuo aplicado. Todavia, por causa de limitações experimentais o líquido não conseguiu percorrer a tela e chagar até a região de aplicação do vácuo. Contudo, o aumento das variáveis estudadas forneceram a diminuição desta resposta.

A partir dos modelos referentes as respostas no peneiramento sob vácuo, pode-se determinar qual a condição operacional proporciona um baixo teor de umidade, uma alta porcentagem de sólidos retidos e uma baixa porcentagem de área ocupada pelo líquido. O ponto ótimo operacional foi obtido com $x_1 = -1$ (força-g de 3,0), $x_2 = -0,45$ (inclinação da tela de 0,825°) e $x_3 = 1$ (concentração volumétrica de 6,0%). Esse resultado teve o teor de umidade de 18,08%, a porcentagem de sólidos retidos de 77,70% e a porcentagem de área ocupada pelo líquido de 36,85%.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

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

- Melhorar o sistema de mistura do tanque de alimentação para proporcionar uma mistura homogênea perfeita.
- Substituir as válvulas de alimentação e recirculação da unidade experimental devido a deposição de sólidos nas mesmas, impedindo a abertura e o fechamento total.
- Instalar sensores de nível nos tanques de alimentação e de coleta do fluido passante, de modo a monitorar o nível destes e permitir inferir a vazão de fluido passante pela peneira.
- Utilizar o fluido de perfuração e o cascalho de perfuração nos experimentos em substituição do fluido simulante e dos sólidos utilizados neste trabalho.

- Fazer experimentos para determinar o teor de umidade residual e a porcentagem de sólidos retidos com a aplicação do vácuo na região de alimentação ou na região intermediária da peneira.
- Utilizar o *LabView* para implementar o controle de vazão da alimentação da peneira.
- Desenvolver um sensor de umidade *online* para monitorar o teor de umidade residual dos sólidos retidos da peneira.
- Iniciar os experimentos na peneira industrial (*scaleup*).
- Avaliar os modelos desenvolvidos neste trabalho e os desenvolvidos por Guerreiro (2015) e Freitas (2017) na operação da peneira de escala industrial.

REFERÊNCIAS

- AADE. **Shale shakers and drilling fluid systems.** Houston, Texas: Gulf Publishing Company. 1999.
- AMORIM, L. V. **Melhoria, proteção e recuperação da reologia de fluidos hidroargilosos para uso na perfuração de poços de petróleo.** 290 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, Paraíba, 2003.
- AMOCO. **Drilling Fluids Manual.** USA, 1994. 444p.
- ASME. **Drilling Fluid Processing Handbook.** Burlington, USA: Gulf Professional Publishing, 2005. 693 p
- BARBOSA, V. P.; MENEZES, A. L.; GEDRAITE, R.; ATAÍDE, C. H.; MALAGONI, R. A.; MURATA, V. V.; LOPES, L. C. O. Capacidade operacional da peneira vibratória. **Encontro Nacional de Hidráulica de Perfuração de Poços de Petróleo.** Pedra Azul, Domingos Martins – ES. 2017.
- BARDSLEY, D. S. Containing, Disposing of Drilling Mud and Drilling Cuttings. 2015. Disponível em: <<https://www.nationaldriller.com/articles/90037-containing-disposing-of-drilling-mud-and-drilling-cuttings>>. Acesso em 06 jan 2018.
- BALTAR, C. A. M; LUZ, A. B. **Insumos minerais para perfuração de poços de petróleo.** Rio de Janeiro: CETEM/UFPE, 2003. 91 p.
- BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria.** Editora da Unicamp, Campinas, 2001.
- BICALHO, I. C. **Estudo experimental e de simulação por CFD de escoamentos em seções anulares com excentricidade variável e obstrução parcial da coluna.** 2015. 213 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.
- BOTNMARK, K.; MIKALSEN, K.; JENSEN, O. D.; SAASEN, A.; HOSET, H.; KALVENES, Ø.; SØRGÅRD, E.; MATHIASSEN, S. Optimized Performance by the Use of Rotating Separators as an Alternative to Shale Shakers. In: SPE ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION, 2001, New Orleans. **Society of Petroleum Engineers**, 2001. <https://doi.org/10.2118/71381-MS>
- D'ALMEIDA, A. L. **Indústria do petróleo no Brasil e no mundo: formação, desenvolvimento e ambiência atual.** São Paulo: Blucher, 2015.
- DARLEY, H. C. H.; GRAY, G. R. **Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids.** Fifth Edition, Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 1988. 643 p.

- DIAS, J. L. M.; QUAGLINO, M. A. **A questão do petróleo no Brasil: uma história da PETROBRAS.** Rio de Janeiro: CPDOC: PETROBRAS, 1993. 211 p.
- DORRY, K. E. Effect of Constant-G Control on Shale Shaker Performance. In: American Association Of Drilling Engineers Fluids Conference And Exhibition, 2010, Houston. **American Association of Drilling Engineers**, Houston: [s.n.], 2010.
- ESPÍNOLA, A. **Ouro Negro – Petróleo no Brasil: pesquisa em terra, na plataforma continental e em águas profundas.** 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2013.
- FARIAS, K. V.; AMORIM, L. V.; LIRA, H. L. Desenvolvimento de fluidos aquosos para aplicação em perfuração de poços de petróleo – Parte I. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 4, n. 1, p. 14-25, 2009.
- FELDER, R. M.; ROUSSEAU, R. W. **Elementary Principles of Chemical Processes.** 3rd edition. United States of America: John Wiley & Sons, Inc. 2005.
- FINK, J. **Petroleum engineer's guide to oil field chemicals and fluids.** Second Edition. Gulf Professional Publishing. 2015.
- FOWLER, R. T.; LIM, S. C. The influence of various factors upon the effectiveness of separation of a finely divided solid by a vibrating screen. **Chemical Engineering Science**, v. 10, p. 163-170, 1959. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(59\)80044-0](https://doi.org/10.1016/0009-2509(59)80044-0)
- FREITAS, M. S. **Avaliação do comportamento dinâmico do peneiramento vibratório utilizando modelos identificados.** 99 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. 2017.
- GUERREIRO, F. S. **Estudo experimental do peneiramento vibratório em batelada de suspensão diluída de reocha fosfática: determinação do teor de umidade de material retido, e eficiência granulométrica e diâmetro de corte.** 67f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. 2015.
- GUIFENG, W.; XIN, T. Screening efficiency and screen length of a linear vibrating screen using DEM 3D simulation. **Mining Science and Technology**, v. 21, p. 451-455, 2011.
- HOBEROCK, L. L. A Study of Vibratory Screening of Drilling Fluids. **Journal of Petroleum Technology**, v. 32, 1980.
- KELLY, E.G.; SPOTSWOOD, D.J. **Introduction to Mineral Processing.** New York, Wiley, 1982.
- IIZUKA, E. K. **Análise de tensões em peneiras vibratórias através de modelagem numérica utilizando o método dos elementos finitos e experimentalmente por extensometria.** 203 p. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2006.
- LARSON, A.; BLIKRA, H.; FLORVAAG, M.; VASSHUS, J. K.; MALMIN A.; GRELLAND, T.; SROKKNES, A.; SAASEN, A. Solids Control Device Optimised For Proper

- Occupational Hygiene. In: SPE EUROPEAN HSE CONFERENCE AND EXHIBITION, 2013, Londres. **Society of Petroleum Engineers**, 2013. <https://doi.org/10.2118/164953-MS>
- LUMMUS, J.L.; AZAR, J.J. Drilling fluids optimization a practical field approach, **PennWell Publishing Company**, Tulsa, Oklahoma, 1986.
- LUSTOSA, M. C. J. **Meio ambiente, inovação e competitividade na indústria brasileira: a cadeia produtiva do petróleo**. 246 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2002.
- MARTINS, D. **Ipiranga: a trajetória de uma refinaria em Rio Grande (RS) rumo à consolidação de um grupo empresarial (1930-1967)**. 2008. 140 f. Dissertação (Mestrado em História) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- MELLO, E. V. **Top drive: aplicações e experiências em sistemas de perfuração**. TCC – Departamento de Engenharia Química e de Petróleo – Universidade Federal Fluminense, 2014.
- MI SWACO. **Drilling Fluids Engineering Manual**. Houston, USA, 1998.
- MI SWACO. SCREEN PULSE Separator Reduces Water Content in Cuttings and Drilling Waste, Saves USD 13,500 per Well. 2017. Disponível em: <<http://www.slb.com/~media/Files/miswaco/cs-solids-control/screen-pulse-consorcio-shushuf-indi-ecuador-CS.pdf>> Acesso em 12 fev. 2017.
- MORAIS, J. M. **Petróleo em água profundas: uma história tecnológica da Petrobrás na exploração e produção offshore**. Ipea: Petrobras, Brasília, 2013. 424 p.
- NEVES, C. F. C.; SCHVARTZMAN, M. M. A. M.; JORDÃO, E. Técnica para seleção de variáveis aplicada à separação de gases. **Química Nova**. Vol. 25, No. 2, 327-329, 2002. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422002000200022>
- PEREIRA, A. F. C. **Problemas de estabilização de poços petrolíferos: as questões críticas no onshore e no offshore**. Dissertação (Mestrado) – Técnico Lisboa, 2014.
- PEREIRA, F. A. R. **Escoamento laminar de líquidos não-newtonianos em seções anulares: estudos de CFD e abordagem experimental**. 2006. 251 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.
- PEREIRA, M. S. **Caracterização de cascalho e lama de perfuração ao longo do processo de controle de sólidos em sondas de petróleo e gás**. 2010. 129 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. 2010.
- PEREIRA, M. S. **Aplicação de secagem por microondas no tratamento de cascalho de perfuração**. 2013. 122f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. 2013.

- RAJA, V. **Shale Shaker Model and Experimental Validation.** 2012. 292f. Tese (Doctor of Philosophy) – Chemical Engineering, University of Akron, Akron, 2012.
- RAJA, V.; CHASE, G. G.; JONES, B. N.; GEEHAN, T. Continuum Model of a Shale Shaker. In: American Association Of Drilling Engineers Fluids Technical Conference And Exhibition, 2010, Houston. **American Association of Drilling Engineers**, Houston: [s.n.], 2010.
- 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, Rio de Janeiro, 2002.
- SCHIAVI, M. T.; HOFFMANN, W. A. M. Cenário petrolífero: sua evolução, principais produtores e tecnologias. **Rev. Digit. Bibliotecon. Cienc. Inf.**, Campinas-SP, v. 13, n.2, p.259-278, maio/ago., 2015.
- SILVA, N. S. **Avaliação numérico-experimental de modelos analíticos para previsão de fadiga multi-axial de tubos de perfuração de poços de petróleo.** 106 p. Dissertação (Mestrado) – UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2008.
- TEHRANI, M. A.; POPPLESTONE, A.; GUARNERI, A.; CARMINATI, S. **Water-based drilling fluid for HT/HP applications.** In: **International Symposium on oilfield chemistry. Society of Petroleum Engineers**, Texas, USA, 2007.
- THOMAS, J. E. **Fundamentos de engenharia do petróleo.** Rio de Janeiro: Interciência: Petrobras, 2001. 271 p.
- WILLS, B. A.; NAPIER-MUNN, T. J. **Wills' Mineral Processing Technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery.** 7^a ed. Amsterdam: **Elsevier Science and Technology Books**, 2005. 444p.

APÊNDICE A

Respostas experimentais para o teor de umidade residual.

Tabela A.1: Respostas experimentais do teor de umidade residual em triplicata.

EXP	x_1	x_2	x_3	Teor de umidade residual (Sem vácuo)	Teor de umidade residual (Com vácuo)
1	-1	-1	-1	22,06	20,43
2	-1	-1	-1	21,83	20,21
3	-1	-1	-1	22,08	20,04
4	0	-1	-1	21,66	20,85
5	0	-1	-1	21,33	20,62
6	0	-1	-1	22,19	20,32
7	1	-1	-1	21,91	20,40
8	1	-1	-1	22,05	20,42
9	1	-1	-1	22,31	21,43
10	-1	0	-1	21,80	20,30
11	-1	0	-1	21,57	19,42
12	-1	0	-1	21,79	19,07
13	0	0	-1	21,28	20,65
14	0	0	-1	20,67	19,79
15	0	0	-1	20,89	19,33
16	1	0	-1	21,67	19,33
17	1	0	-1	21,68	19,49
18	1	0	-1	20,66	20,32
19	-1	1	-1	22,72	20,08
20	-1	1	-1	22,15	19,61
21	-1	1	-1	21,79	19,34
22	0	1	-1	21,53	19,44
23	0	1	-1	21,43	19,56
24	0	1	-1	21,13	18,93
25	1	1	-1	21,69	19,87
26	1	1	-1	21,32	19,31
27	1	1	-1	20,53	19,85
28	-1	-1	0	19,94	19,98
29	-1	-1	0	19,64	18,98
30	-1	-1	0	19,52	18,76
31	0	-1	0	20,36	20,10
32	0	-1	0	20,09	19,10

Tabela A.1 – continuação

EXP	x_1	x_2	x_3	Teor de umidade residual (Sem vácuo)	Teor de umidade residual (Com vácuo)
33	0	-1	0	19,94	19,09
34	1	-1	0	20,23	19,53
35	1	-1	0	20,24	19,30
36	1	-1	0	20,52	19,93
37	-1	0	0	19,37	19,54
38	-1	0	0	19,00	18,86
39	-1	0	0	18,96	18,52
40	0	0	0	20,18	19,36
41	0	0	0	19,22	19,12
42	0	0	0	19,04	18,86
43	1	0	0	19,70	19,58
44	1	0	0	20,13	19,13
45	1	0	0	19,95	19,02
46	-1	1	0	19,82	19,55
47	-1	1	0	20,14	19,09
48	-1	1	0	19,22	18,46
49	0	1	0	19,66	18,79
50	0	1	0	19,51	18,82
51	0	1	0	19,15	18,52
52	1	1	0	19,01	19,10
53	1	1	0	18,99	19,04
54	1	1	0	19,41	18,99
55	-1	-1	1	19,17	18,58
56	-1	-1	1	18,80	18,42
57	-1	-1	1	18,81	18,33
58	0	-1	1	19,30	18,89
59	0	-1	1	18,87	18,85
60	0	-1	1	18,93	18,81
61	1	-1	1	18,98	19,47
62	1	-1	1	19,65	19,68
63	1	-1	1	19,70	19,05
64	-1	0	1	18,56	18,37
65	-1	0	1	18,42	18,04
66	-1	0	1	18,88	17,57
67	0	0	1	18,51	19,02
68	0	0	1	18,61	18,58
69	0	0	1	19,00	18,48
70	1	0	1	19,26	19,33
71	1	0	1	19,09	18,63
72	1	0	1	19,28	18,86
73	-1	1	1	18,67	18,72

Tabela A.1 – continuação

EXP	x_1	x_2	x_3	Teor de umidade residual (Sem vácuo)	Teor de umidade residual (Com vácuo)
74	-1	1	1	19,05	18,24
75	-1	1	1	19,06	17,70
76	0	1	1	18,77	18,99
77	0	1	1	18,55	18,18
78	0	1	1	18,59	18,28
79	1	1	1	18,51	19,16
80	1	1	1	18,56	18,82
81	1	1	1	18,65	19,05

Respostas experimentais para a porcentagem de área ocupada pelo líquido.

Tabela A.2: Respostas experimentais da área molhada em triplicata.

EXP	x_1	x_2	x_3	Porcentagem de área ocupada pelo líquido
1	-1	-1	-1	50,78
2	-1	-1	-1	50,42
3	-1	-1	-1	51,32
4	0	-1	-1	45,86
5	0	-1	-1	49,86
6	0	-1	-1	47,13
7	1	-1	-1	47,10
8	1	-1	-1	48,13
9	1	-1	-1	48,31
10	-1	0	-1	50,07
11	-1	0	-1	49,88
12	-1	0	-1	50,13
13	0	0	-1	44,72
14	0	0	-1	45,08
15	0	0	-1	45,33
16	1	0	-1	46,59
17	1	0	-1	47,17
18	1	0	-1	47,26
19	-1	1	-1	47,92
20	-1	1	-1	46,43
21	-1	1	-1	47,80
22	0	1	-1	44,46
23	0	1	-1	45,98
24	0	1	-1	45,32

Tabela A.2 – continuação

EXP	x_1	x_2	x_3	Porcentagem de área ocupada pelo líquido
25	1	1	-1	45,71
26	1	1	-1	45,70
27	1	1	-1	44,30
28	-1	-1	0	38,10
29	-1	-1	0	39,47
30	-1	-1	0	36,90
31	0	-1	0	36,31
32	0	-1	0	35,15
33	0	-1	0	36,44
34	1	-1	0	36,62
35	1	-1	0	34,97
36	1	-1	0	36,81
37	-1	0	0	42,11
38	-1	0	0	40,04
39	-1	0	0	39,14
40	0	0	0	35,56
41	0	0	0	36,05
42	0	0	0	36,14
43	1	0	0	32,67
44	1	0	0	33,47
45	1	0	0	33,26
46	-1	1	0	40,64
47	-1	1	0	39,36
48	-1	1	0	40,49
49	0	1	0	37,08
50	0	1	0	35,95
51	0	1	0	35,54
52	1	1	0	35,16
53	1	1	0	36,08
54	1	1	0	35,28
55	-1	-1	1	36,69
56	-1	-1	1	37,50
57	-1	-1	1	39,02
58	0	-1	1	32,75
59	0	-1	1	34,65
60	0	-1	1	33,16
61	1	-1	1	31,19
62	1	-1	1	31,71
63	1	-1	1	31,62
64	-1	0	1	34,37
65	-1	0	1	34,95

Tabela A.2 – continuação

EXP	x_1	x_2	x_3	Porcentagem de área ocupada pelo líquido
66	-1	0	1	34,86
67	0	0	1	31,79
68	0	0	1	31,64
69	0	0	1	32,26
70	1	0	1	30,24
71	1	0	1	29,15
72	1	0	1	29,22
73	-1	1	1	36,25
74	-1	1	1	38,32
75	-1	1	1	33,81
76	0	1	1	31,42
77	0	1	1	32,29
78	0	1	1	32,45
79	1	1	1	25,19
80	1	1	1	28,05
81	1	1	1	27,22

APÊNDICE B

Gráficos dos resíduos gerados pelas regressões

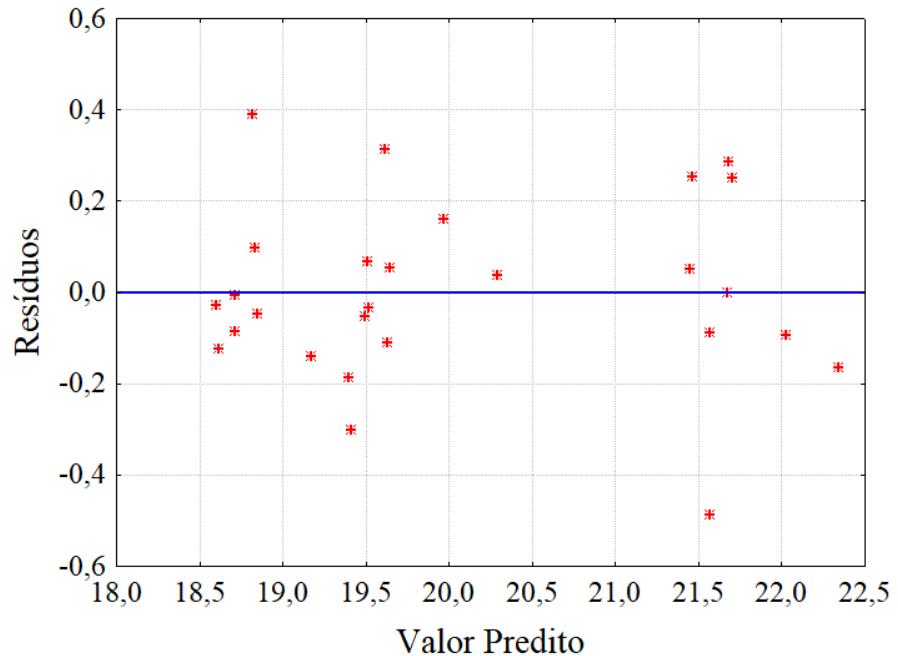


Figura B.1: Distribuição dos resíduos para o teor de umidade residual (sem vácuo).

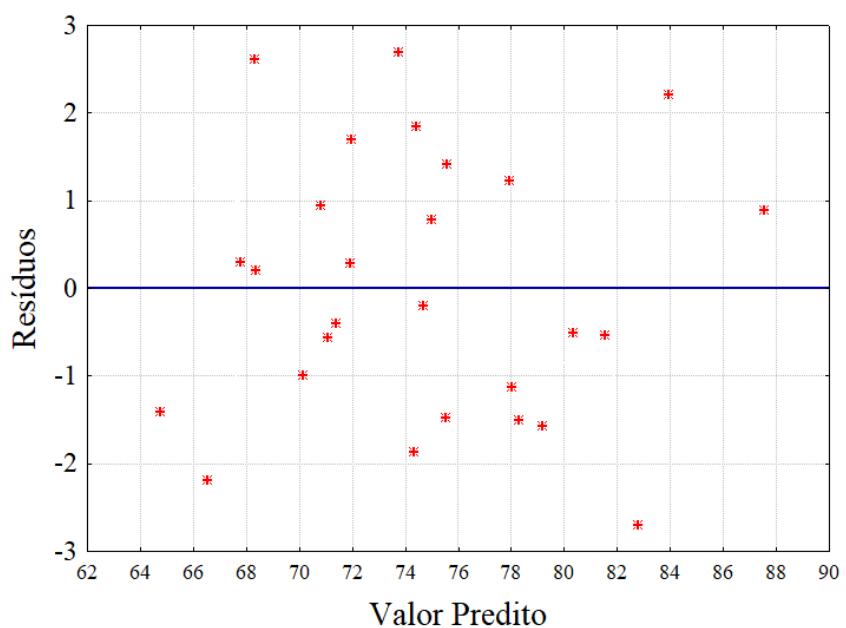


Figura B.2: Distribuição dos resíduos para a porcentagem de sólidos retidos (sem vácuo).

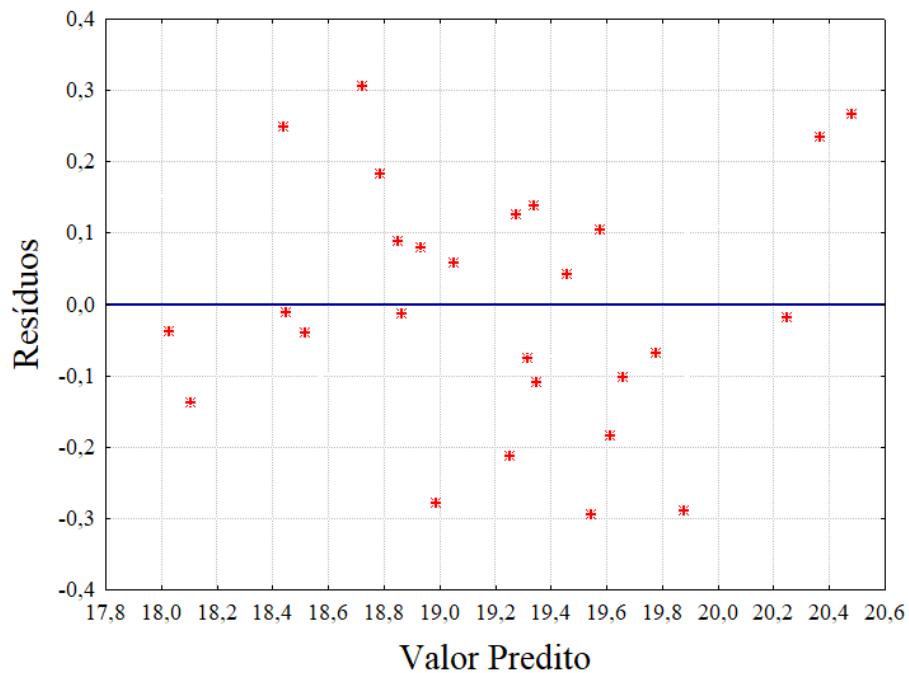


Figura B.3: Distribuição dos resíduos para o teor de umidade residual (com vácuo).

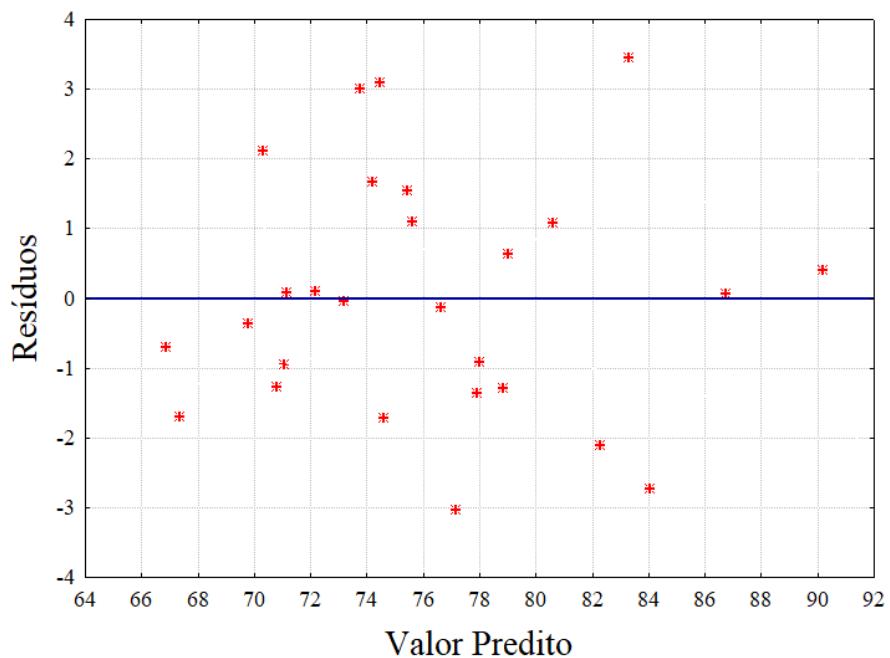


Figura B.4: Distribuição dos resíduos para a porcentagem de sólidos retidos (com vácuo).

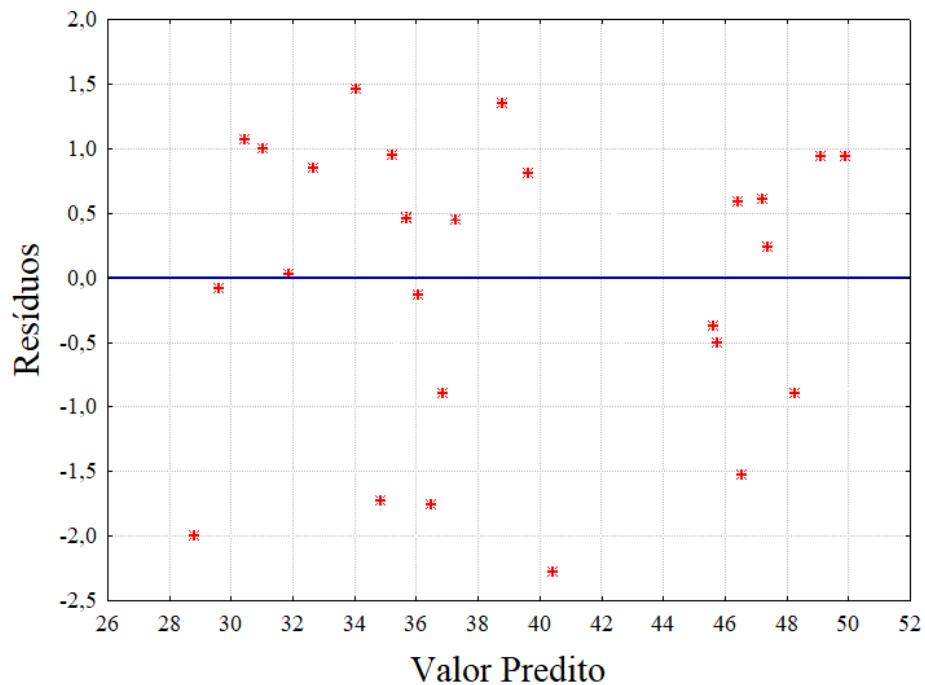


Figura B.5: Distribuição dos resíduos para a porcentagem de área ocupada pelo líquido (com vácuo).

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

APÊNDICE C

Programa para determinação do ponto ótimo de operação criado no *software Excel*.

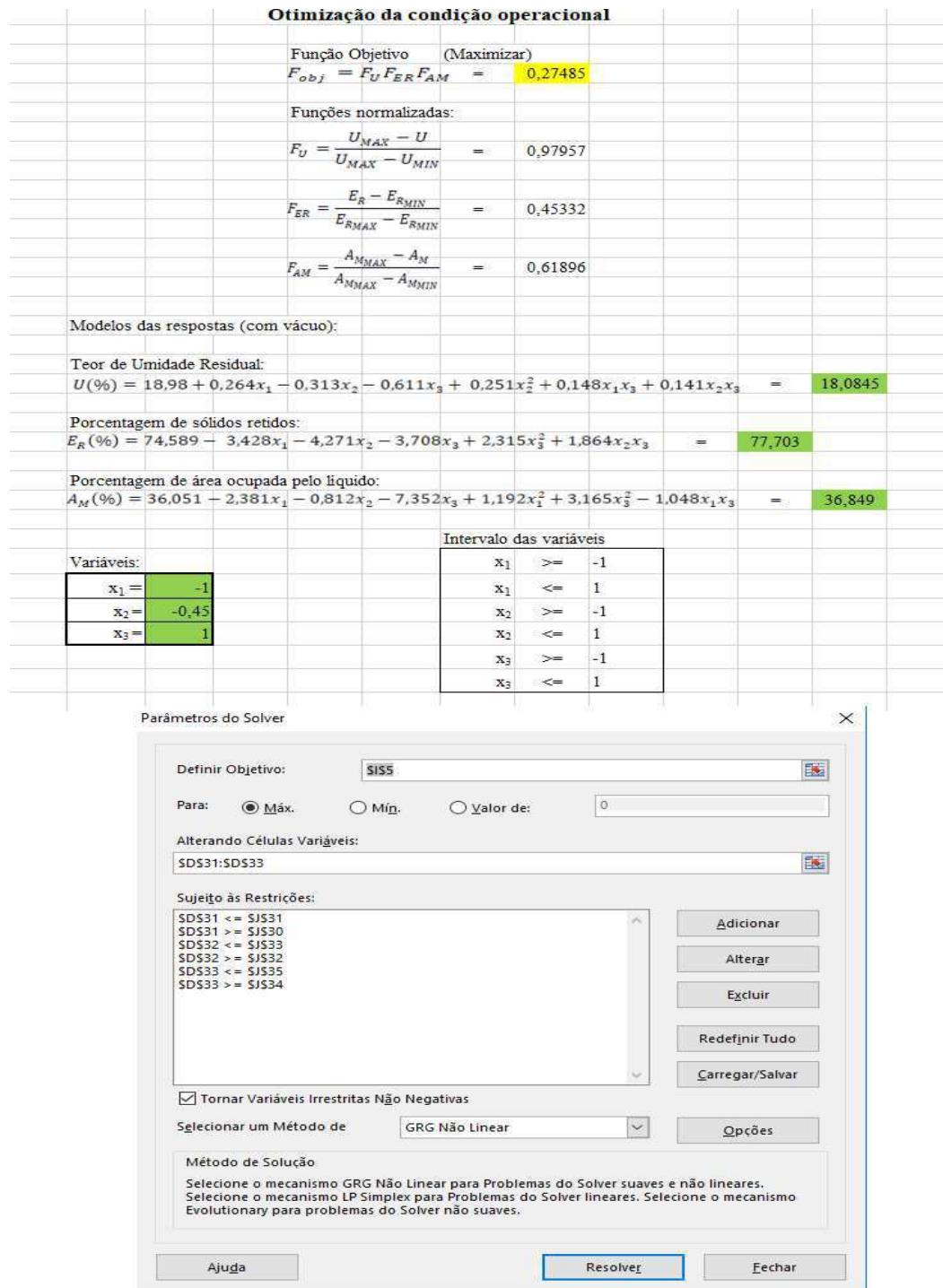


Figura C.1: Programa para determinar o ponto ótimo operacional