



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



**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**AVALIAÇÃO DE FATORES OPERACIONAIS EM PROCESSO DE  
PENEIRAMENTO VIBRATÓRIO APLICADO À SEPARAÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO  
COM O AUXÍLIO DE TÉCNICAS DE ANÁLISE DE IMAGEM**

**VINÍCIUS PIMENTA BARBOSA**

**Uberlândia–MG**

**2018**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA**



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**AVALIAÇÃO DE FATORES OPERACIONAIS EM PROCESSO DE  
PENEIRAMENTO VIBRATÓRIO APLICADO À SEPARAÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO  
COM O AUXÍLIO DE TÉCNICAS DE ANÁLISE DE IMAGEM**

**Autor: Vinícius Pimenta Barbosa**

**Orientador: Carlos Henrique Ataíde**

**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.

---

B238a      Barbosa, Vinícius Pimenta, 1987-  
2018      Avaliação separação sólido-líquido com o auxílio de técnicas de  
análise de imagem de fatores operacionais em processo de peneiramento  
vibratório aplicado à / Vinícius Pimenta Barbosa. - 2018.  
98 f. : il.

Orientador: Carlos Henrique Ataíde.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.  
Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.252>  
Inclui bibliografia.

1. Engenharia química - Teses. 2. Poços de petróleo - Fluidos de  
perfuração - Teses. 3. Poços de petróleo - Perfuração - Teses. 4. Análise  
de imagem - Teses. I. Ataíde, Carlos Henrique. 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 19 /02 /2018.

BANCA EXAMINADORA:

---

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

---

Prof. Dr. Rubens Gedraite  
(PPGEQ/UFU)

---

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

---

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

*Aos meus pais, Altair e Mônica, meus irmãos,  
Diego e Fernanda, e meu amor Andressa*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por toda a saúde e a minha família, que sempre me apoiou e incentivou em todas as minhas escolhas.

Ao meu grande amor Andressa e também sua família.

Ao meu orientador professor Doutor Carlos Henrique Ataíde, pelo suporte e orientação nas pesquisas e disponibilização dos recursos para que ela se concretizasse.

Ao professor Doutor Rubens Gedraite, um grande amigo, por todo o apoio e pelo incentivo para meu ingresso na pós-graduação em engenharia química, ajuda nas pesquisas e ganho de conhecimento na área acadêmica.

À professora Doutora Valéria Viana Murata, pela amizade e por todo o suporte e organização da equipe de pesquisa envolvida neste trabalho.

Ao meu amigo Anderson Lima de Menezes, pela ajuda na realização dos experimentos.

Aos amigos da Unidade de Pesquisas da Engenharia Química (UPEQ) e do Laboratório de Otimização e Modelagem (LOM), é sempre um prazer trabalhar com vocês.

À Petrobrás, pelo financiamento da pesquisa e suporte do pessoal envolvido em relação a dicas valiosas sobre a operação do equipamento.

A Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia pela ótima formação acadêmica e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química pela oportunidade de me qualificar nesta ótima instituição de ensino.

*“O homem não é nada além daquilo que a educação faz dele”*

*Immanuel Kant*

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>I</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>III</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>IV</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>V</b>
<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 JUSTIFICATIVA PARA REALIZAÇÃO DO TRABALHO.....	2
1.2 OBJETIVOS .....	2
 <b>CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>3</b>
2.1 FLUIDO DE PERFURAÇÃO.....	3
2.1.1 Características do fluido de perfuração .....	3
2.1.2 Propriedades do fluido de perfuração .....	4
2.1.2.1 Densidade .....	4
2.1.2.2 Parâmetros reológicos.....	5
2.1.2.3 Forças géis .....	5
2.1.2.4 Parâmetros de filtração .....	5
2.1.2.5 Teor de sólidos .....	5
2.1.2.6 Correção hidrogeniônica – pH.....	6
2.1.2.7 Teor de cloretos ou salinidade .....	6
2.1.2.8 Teste de bentonita ou sólidos ativos .....	6
2.1.3 Tipos de fluido de perfuração .....	6
2.1.3.1 Fluidos de base aquosa .....	6
2.1.3.2 Fluidos de base não aquosa .....	7
2.2 CASCALHOS PROVENIENTES DA PERFURAÇÃO DO POÇO .....	8
2.3 UNIDADE DE CONTROLE DE SÓLIDOS .....	8
2.3.1 Peneira vibratória.....	9
2.3.2 Hidrociclones.....	10
2.3.3 Centrífuga decantadora.....	12
2.4 DESCARTE DOS SÓLIDOS CONTAMINADOS.....	12
2.5 PENEIRAMENTO VIBRATÓRIO.....	13
2.5.1 Funcionamento da peneira vibratória .....	14
2.5.2 Avaliação do desempenho do processo de peneiramento vibratório.....	17



2.5.2.1	Teor de umidade dos sólidos retidos .....	17
2.5.2.2	Eficiência de separação granulométrica .....	18
2.5.3	Variáveis operacionais no peneiramento vibratório .....	22
2.5.3.1	Vibração (Força-g) .....	22
2.5.3.2	Concentração volumétrica de sólidos .....	25
2.5.3.3	Vazão de alimentação .....	25
2.5.3.4	Inclinação da tela de peneiramento .....	26
2.5.3.5	Abertura da tela de peneiramento .....	26
2.5.3.6	Propriedades reológicas do fluido .....	30
2.5.3.7	Granulometria dos sólidos .....	30
2.6	ANÁLISE DE IMAGEM .....	31
2.6.1	Processamento digital de imagens .....	32
2.6.1.1	Pixels .....	32
2.6.1.2	Resolução .....	33
2.6.1.3	Medida de distância entre pixels .....	34
2.6.1.4	Cor .....	35
2.6.1.5	Histograma .....	36
2.6.1.6	Transformação de uma imagem em cores para tons de cinza .....	36
2.6.1.7	Binarização de uma imagem.....	38
2.6.1.8	Filtros de imagem .....	40
<b>CAPÍTULO 3 - MATERIAL E MÉTODOS.....</b>		<b>43</b>
3.1	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....	43
3.2	MATERIAL PARA O EXPERIMENTO .....	45
3.3	UNIDADE EXPERIMENTAL .....	46
3.3.1	Peneira vibratória.....	47
3.3.2	Sistema de alimentação da peneira.....	48
3.3.3	Sistema de controle de força-g .....	50
3.3.4	Aquisição de imagem .....	52
3.3.5	Inclinação da tela.....	52
3.4	METODOLOGIA.....	53
3.4.1	Preparação da suspensão sólido-líquido .....	53
3.4.2	Execução dos experimentos.....	53

<b>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>55</b>
4.1      RESULTADOS E ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	55
4.2      ANÁLISE DE IMAGENS .....	58
4.3      TEOR DE UMIDADE DOS SÓLIDOS RETIDOS.....	59
4.4      ÁREA DE PISCINA.....	61
4.5      VELOCIDADE DE TRANSPORTE DOS SÓLIDOS RETIDOS.....	63
4.6      ÁREA DE TELA OCUPADA PELOS SÓLIDOS NA REGIÃO DE SECAGEM....	67
 <b>CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	 <b>71</b>
5.1      SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	73
 <b>REFERÊNCIAS .....</b>	 <b>74</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>78</b>
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>81</b>
<b>APÊNDICE C .....</b>	<b>82</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Variação na distribuição granulométrica dos sólidos de acordo com o poço perfurado.....	8
Figura 2.2: Peneira vibratória. ....	10
Figura 2.3: Esquema funcionamento hidrociclone. ....	11
Figura 2.4: centrífuga decantadora. ....	12
Figura 2.5: Tipos de movimento de uma peneira vibratória.....	15
Figura 2.6: Inclinação e combinação de telas para peneiras vibratórias. ....	16
Figura 2.7: Ilustração das diferentes regiões envolvidas no processo de peneiramento vibratório. ....	17
Figura 2.8: Fluxograma de separação de peneiramento. ....	18
Figura 2.9: Corpo excêntrico de um motovibrador. ....	23
Figura 2.10: Partículas presas nas aberturas de uma tela de peneiramento ( <i>blinding</i> ). ....	27
Figura 2.11: Diferentes arranjos de trama e espessuras de fio de uma tela de peneiramento. .	27
Figura 2.12: Tela multicamada. ....	29
Figura 2.13: Pixels formando uma figura. ....	33
Figura 2.14: Variação de resolução com o número de pixels.....	33
Figura 2.15: Coordenada pixel. ....	34
Figura 2.16: Relação da medida real e número de pixels.....	35
Figura 2.17: Histograma de frequência de pixels. ....	36
Figura 2.18: Foto em cores transformada em tons de cinza. ....	37
Figura 2.19: Tons de cinza em função do número de bits de uma imagem. ....	37
Figura 2.20: Imagem binária. ....	38
Figura 2.21: Imagem em tons de cinza e seu histograma. ....	39
Figura 2.22: Aplicação do <i>threshold</i> no histograma de uma imagem. ....	39
Figura 2.23: Binarização de uma imagem. ....	40
Figura 2.24: Figura esquemática da vizinhança de um pixel. ....	41
Figura 2.25: Máscara de um filtro. ....	42
Figura 3.1: Ilustração esquemática da unidade experimental.....	46
Figura 3.2: Motovibradores da peneira vibratória. ....	47
Figura 3.3: Distribuidor de alimentação da peneira vibratória.....	48
Figura 3.4: Medidor de taxa mássica tipo Coriolis.....	48

Figura 3.5: Saída material retido e passante da peneira. ....	49
Figura 3.6: Sistema de alimentação/recirculação. ....	50
Figura 3.7: Circulação da mistura na unidade experimental. ....	50
Figura 3.8: (a) Inversor de frequência (b) Placa de aquisição de dados. ....	51
Figura 3.9: Força-g versus Tempo.....	51
Figura 3.10: Sistema para fixação da câmera. ....	52
Figura 3.11: Macaco mecânico para ajuste da inclinação. ....	52
Figura 4.1: Resultados dos experimentos com os desvios padrão para o teor de umidade residual dos sólidos retidos pela peneira. ....	56
Figura 4.2: Resultados dos experimentos com os desvios padrão para a área de piscina. ....	57
Figura 4.3: Resultados dos experimentos com os desvios padrão para a velocidade de transporte dos sólidos na região de secagem. ....	57
Figura 4.4: Resultados dos experimentos com os desvios padrão para a porcentagem de sólidos na região de secagem.....	58
Figura 4.5: Superfícies de resposta para o teor de umidade. ....	60
Figura 4.6: Demarcação da área de inundação medida através de análise de imagem. ....	61
Figura 4.7: Superfícies de resposta para a área de piscina. ....	62
Figura 4.8: Análise do vídeo utilizado para avaliação da velocidade de transporte dos sólidos retidos. ....	64
Figura 4.9: Superfícies de resposta para a velocidade de transporte dos sólidos retidos na região de secagem.....	66
Figura 4.10: Binarização da região ocupada pelos sólidos na região de secagem. ....	67
Figura 4.11: Superfícies de resposta para a área de tela ocupada pelos sólidos na região de secagem. ....	69
Figura 4.12: Relação entre velocidade de transporte dos sólidos retidos e área de tela ocupada pelos sólidos na região de secagem. ....	70
Figura A.1: Gráfico dos resíduos do teor de umidade residual dos sólidos retidos .....	82
Figura A.2: Gráfico dos resíduos da área de piscina. ....	83
Figura A.3: Gráfico dos resíduos da velocidade de transporte dos sólidos retidos. ....	83
Figura A.4: Gráfico dos resíduos da porcentagem de área de tela ocupada pelos sólidos úmidos retidos na região de praia. ....	84

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1: Designação de hidrociclones de acordo com a faixa operacional. ....	11
Tabela 3.1: Matriz do PCC utilizado. ....	44
Tabela 3.2: Variáveis e níveis para o PCC. ....	44
Tabela 4.1: Resultados dos experimentos. ....	55
Tabela A.1: Resultados experimentais para as variáveis analisadas .....	78

## RESUMO

Durante a perfuração de poços de petróleo, é injetado pelo interior da coluna de perfuração o fluido de perfuração, que tem diversas funções como: carrear os sólidos provenientes do corte das rochas para a superfície, lubrificar a coluna de perfuração, arrefecer a broca, estabilizar o poço, entre outras. Para recondicionar este fluido, é utilizada a unidade de controle de sólidos, que tem como objetivo retirar os sólidos produzidos pela perfuração da rocha e recondicionar o fluido para que este volte ao processo de perfuração. O primeiro equipamento da unidade de controle de sólidos é a peneira vibratória. O objetivo deste trabalho foi avaliar a operação de peneiramento vibratório aplicado à separação sólido-líquido frente ao efeito das variáveis independentes: força-g, concentração volumétrica de sólidos na alimentação, vazão de alimentação e inclinação da tela de peneiramento. Foi feito um planejamento composto central para os experimentos com uma réplica no ponto central, totalizando 26 experimentos. Foram avaliadas as variáveis dependentes: teor de umidade residual dos sólidos retidos, área de região de piscina, velocidade de transporte dos sólidos retidos na região de praia e porcentagem de área de tela ocupada pelos sólidos retidos na região de praia. Para a parte líquida da suspensão foi utilizado água com 0,1% em massa de goma xantana, já para a sólida foi utilizado areia padronizada com diâmetro médio de Sauter de 373  $\mu\text{m}$ . A tela utilizada na peneira foi de 175 mesh. Pela análise dos resultados, foi possível verificar que o menor valor de área de piscina foi de 906,695  $\text{cm}^2$ , resultante da combinação dos maiores níveis de força-g (5), concentração volumétrica de sólidos na alimentação (5%) e inclinação de tela (3,5°), com o menor nível de vazão de alimentação (19 kg/min). Para o teor de umidade residual dos sólidos retidos, foi observado uma forte influência das variáveis força-g e concentração volumétrica de sólidos na alimentação, sendo o maior valor de umidade residual de 22,862%, para a combinação de maior nível de força-g (5) e menor de concentração volumétrica de sólidos na alimentação (3%). Já o menor valor de umidade residual dos sólidos retidos foi de 19,211%, para o menor nível de força-g (2,5) combinado com o maior de concentração volumétrica de sólidos (5%). A maior velocidade de transporte dos sólidos retidos foi de 17,00cm/s, para a combinação dos maiores níveis de força-g (5), concentração volumétrica de sólidos (5%) e inclinação (2,5°) com o menor nível de vazão de alimentação (25 kg/min). Também foi constatado que maiores velocidade de transporte têm grande influência na diminuição da porcentagem de área de tela ocupada na região de praia pelos sólidos úmidos retidos. A conclusão foi que o aumento das variáveis força-g e inclinação aumentam a capacidade operacional da peneira, pois diminuem a área de piscina, além da região de tela ocupada pelos sólidos retidos. A manutenção adequada destas variáveis permite a correção de desvios causados por oscilações na vazão de alimentação e concentração volumétrica de sólidos.

**Palavras-chave:** Peneiramento vibratório, Separação sólido- líquido, Perfuração de poços de petróleo, Análise de imagem

## ABSTRACT

During the drilling of oil wells, the drilling fluid is injected into the drilling column, which has several functions such as: driving the solids from the rock cutting to the surface, lubricating the drilling column, cooling the drill bit, stabilizing the well, among others. To recondition this fluid, the solid control unit is used, which aims to remove the solids produced by the rock drilling and to recondition the fluid so that it returns to the drilling process. The first equipment of the solid control unit is the vibrating screen. The objective of this study was to evaluate the vibration screening operation applied to the solid-liquid separation against the effect of the independent variables: g-force, volumetric concentration of solids in the feed, feed rate and slope of the sieving screen. A central composite design for the experiments with a reply in the center point was made, totalizing of 26 experiments. The dependent variables were: residual moisture content of retained solids, pool area, transport velocity of solids retained in the beach region and percentage of screen area occupied by solids retained in the beach region. For the liquid part of the suspension, water with 0.1% by mass of xanthan gum was used, while for the solid part, standardized sand with a mean Sauter diameter of 373  $\mu\text{m}$ . The screen used in the sieve was 175 mesh. By the analysis of the results, it was possible to verify that the lowest value of pool area was 906,695  $\text{cm}^2$ , resulting from the combination of the highest levels of g-force (5), volumetric solids concentration in the feed (5%), and screen inclination ( $3.5^\circ$ ), with the lowest level of feed rate (19 kg / min). For the residual moisture content of the retained solids, a strong influence of the force-g variables and volumetric concentration of solids in the feed was observed, with the highest residual moisture value of 22.862%, for the combination of higher g-force level (5) and lower volumetric solids concentration in the feed (3%). The lowest residual moisture content of the retained solids was 19.211%, for the lowest level of g-force (2.5) combined with the highest solids concentration (5%). The highest transport velocity of the retained solids was 17.00 cm/s, for the combination of the highest levels of g-force (5), solids volume concentration (5%) and slope ( $2.5^\circ$ ) with the lowest level of feed rate (25 kg / min). It was also observed that higher transport velocities have a great influence on the decrease of the percentage of screen area occupied in the beach region by the retained wet solids. The conclusion was that the increase in g-force and inclination variables increase the operational capacity of the screen, because it reduces the pool area beyond the screen area occupied by the retained solids. Proper maintenance of these variables allows to correct deviations caused by fluctuations in the feed rate and volumetric solids concentration.

**Keywords:** Vibrating screen, Solid-liquid separation, Drilling of oil wells, Image analysis

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

O início e a sustentação do processo de busca com o crescente consumo do petróleo na sociedade moderna datam de 1859, quando foi iniciada a exploração comercial nos Estados Unidos, após a descoberta de um poço com 21 metros de profundidade que produzia 2m<sup>3</sup> de óleo por dia, perfurado por um sistema de percussão movido a vapor (THOMAS, 2001).

O aumento do consumo com as demandas energéticas mundiais, fez com que procura por poços tivesse um avanço tecnológico muito alto, com o aprimoramento de dispositivos de aquisição, processamento e interpretação de dados sísmicos (THOMAS, 2001). Este aumento da procura e os avanços tecnológicos, fez com que poços fossem explorados a profundidades cada vez maiores e em locais de difícil acesso, como em alto mar com a utilização de plataformas.

A busca por poços mais profundos fez com que uma nova forma de perfuração surgisse, com a utilização de brocas rotativas que utilizam fluidos de perfuração, sendo este bombeado a partir da superfície e responsável por garantir a segurança operacional durante a perfuração do poço, retirando os cascalhos gerados pelo corte da broca e os trazendo a superfície, estabilizando o poço e garantindo um bom funcionamento e preservação da broca de perfuração (ASME, 2005).

A presença de componentes tóxicos e danosos ao meio ambiente contidos no fluido de perfuração e o aumento na exploração trouxe preocupações relacionadas ao consumo e impactos ambientais causados, fazendo com que leis ficassem cada vez mais rígidas em relação ao descarte de componentes gerados no processo de perfuração de poços. Isso fez com que fossem criadas regras em relação ao descarte destes resíduos, que variam de acordo com o local da exploração, leis vigentes, além de tipos e teor de componentes tóxicos (CHARLES e SAYLE, 2010).

Devido às restrições ambientais e fatores econômicos, novas tecnologias foram aplicadas para a separação do fluido de perfuração do cascalho, visando o reaproveitamento e diminuição de perdas do fluido de perfuração durante o processo e a redução do teor de componentes tóxicos do fluido junto ao cascalho das rochas perfuradas, que devem ser descartadas com uma carga residual máxima definida por lei.

Para atingir este objetivo, é fundamental o bom funcionamento da unidade de controle de sólidos que é a etapa responsável pela separação dos cascalhos do fluido de perfuração (ASME, 2005).



Uma unidade de controle de sólidos é composta de diversos equipamentos em sequência, que separam o fluido de perfuração dos sólidos de acordo com a faixa granulométrica destes, composta por peneiras vibratórias, hidrociclones e centrífugas (ASME, 2005).

## **1.1 JUSTIFICATIVA PARA REALIZAÇÃO DO TRABALHO**

O primeiro equipamento no sistema de controle de sólidos é a peneira vibratória que tem o objetivo de maximizar a recuperação de fluido de perfuração junto aos cascalhos gerados pela broca na perfuração do poço, como também maximizar a retenção dos sólidos sobre a tela da peneira (AADE, 1999).

O funcionamento da peneira vibratória afeta todos os equipamentos subsequentes, sendo seu bom funcionamento vital para a eficiência global da operação.

Devido ao grande número de variáveis envolvidas no processo de peneiramento, o entendimento da relação entre elas e o processo de separação é uma tarefa difícil (RAJA *et al*, 2012, HOBROCK, 1980)

Por ser um equipamento que envolve o escoamento livre de líquido e material particulado, submetido ao movimento vibratório e com regiões com comportamento distinto, algumas variáveis relacionadas à separação e bom funcionamento se tornam difíceis de serem medidas, assim como o entendimento dinâmico relacionado ao processo.

## **1.2 OBJETIVOS**

O objetivo deste trabalho é determinar como as diferentes variáveis envolvidas na operação de peneiramento vibratório se relacionam e afetam o desempenho do equipamento.

O conjunto de variáveis independentes composto pela força-g, concentração volumétrica de sólidos na corrente de alimentação, vazão de alimentação e inclinação da tela são avaliados em relação às variáveis dependentes: teor de umidade dos sólidos retidos, tamanho da região de piscina, velocidade de transporte e área ocupada pelos sólidos retidos na região de secagem.

Os métodos utilizados neste trabalho se baseiam em técnicas de análise de imagem, já que há restrição de outras formas de medição de algumas das variáveis, devido a características inerentes ao processo.

## **CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste Capítulo é apresentada a base bibliográfica na qual este trabalho se baseia. Dividido em seis Seções, a 2.1 descreve as características e finalidades do fluido de perfuração. A Seção 2.2 descreve a geração e características relacionadas ao cascalho proveniente do corte das rochas durante a perfuração do poço de petróleo. Já na Seção 2.3 é abordada a unidade de controle de sólidos, responsável pela separação da mistura entre fluido de perfuração e cascalho, sendo na Seção 2.4 discutido como é realizado o descarte do cascalho após este processo de separação.

A seção 2.5 trata especificamente da peneira vibratória, alvo de estudo neste trabalho. Já na seção 2.6 são abordadas teorias e técnicas de análise de imagem, ferramenta que foi utilizada para o estudo da operação de peneiramento vibratório.

### **2.1 FLUIDO DE PERFURAÇÃO**

#### **2.1.1 Características do fluido de perfuração**

O fluido de perfuração deve possuir diversas características que são essenciais ao processo de perfuração de um poço, garantindo uma perfuração rápida e segura (THOMAS, 2001), diminuindo prejuízos de ordem operacional (CALÇADA *et al*, 2015). Sendo assim, é desejável que o fluido de perfuração:

- seja estável quimicamente: as características físico-químicas devem permanecer constantes durante o processo de perfuração, sem sofrer modificações com os tratamentos ao qual é submetido ou interações devido às características químicas das formações rochosas.
- estabilize as paredes do poço: a estabilidade das paredes do poço é de extrema importância, pois o desabamento desta pode inviabilizar a continuidade do processo de perfuração, além de causar danos aos equipamentos e riscos de acidentes (WARREN *et al*, 2005).
- seja de fácil separação do cascalho na superfície: para que o fluido retorne em condições adequadas, ele deve ser separado do cascalho e recondicionado antes de ser re-injetado pela coluna de perfuração para dar continuidade ao processo de perfuração.
- mantenha o sólido em suspensão: caso a circulação do fluido cesse, este deve manter os sólidos que transporta à superfície em repouso, evitando que eles decantem em direção a broca, ou entupam alguma seção do poço.
- exerça pressão hidrostática adequada sobre as formações rochosas: Isso evita que fluidos indesejáveis escoem para o poço, como água presente em lençóis freáticos ou

cavernas subterrâneas e gases. Também evita que o petróleo presente no reservatório permeie a formação rochosa em direção ao poço. Além disso, o fluido não deve vaziar para fora do poço através de fissuras na parede deste, o que poderia ocasionar a contaminação da água ou do reservatório (CALÇADA *et al*, 2015).

- não corroa ou cause outros tipos de danos aos equipamentos: o fluido não deve causar danos físicos nem químicos aos equipamentos com o qual mantém contato durante o processo de perfuração.
- permita a avaliação geológica da formação rochosa sendo perfurada: para que as características da formação rochosa sejam avaliadas do ponto de vista geológico, já que isto é necessário para traçar estratégias adequadas à perfuração do poço.
- lubrifique a coluna de perfuração: pois diminui o desgaste da coluna, preservando a operação e a vida útil do equipamento.
- arrefeça a broca: diminui o desgaste da broca devido a elevação da temperatura que é ocasionada pelo atrito da broca com a formação rochosa.

Caso haja inviabilização da perfuração do poço devido a algum problema técnico ou econômico, o fluido de perfuração deve manter a seção já perfurada do poço aberta, de modo que as paredes permaneçam preservadas, mesmo havendo selagem do poço.

A minimização de impactos ambientais também é uma característica que deve ser levada em conta na escolha e desenvolvimento de um fluido de perfuração, visto que o descarte do cascalho proveniente da perfuração apresenta uma carga de contaminantes provenientes do fluido que é danosa ao meio ambiente (CHARLES e SAYLE, 2010).

## **2.1.2 Propriedades do fluido de perfuração**

Dentre as propriedades físicas do fluido de perfuração, pode-se selecionar as que possuem maior importância: densidade, parâmetros reológicos, força-géis, parâmetros de filtração, teor de sólidos, correção hidrogeniônica (pH), teor de cloretos ou salinidade e teste de bentonita ou sólidos ativos (THOMAS, 2001):

### **2.1.2.1 Densidade**

O limite para a variação da densidade dos fluidos de perfuração está compreendido entre dois valores relacionados à operação de perfuração e características do poço. O limite mínimo é definido como a pressão de poro, que é a pressão exercida pelo fluido dentro do espaço poroso da rocha, já o máximo é a pressão de fratura, que é o limite máximo de pressão que a rocha que compõe as paredes do poço suporta. A densidade é controlada através da adição de baritina ( $\text{BaSO}_4$ ), que possui densidade de  $4,25 \text{ g/cm}^3$  contra uma densidade média

de  $2,60 \text{ g/cm}^3$  dos sólidos provenientes da perfuração, quando a intenção é aumentar a densidade. Já para diminuí-la, é adicionado água ou o diluente base utilizado, dependendo da natureza do fluido utilizado.

#### 2.1.2.2 Parâmetros reológicos

Leva em conta o modelo reológico que o fluido segue e como seus parâmetros reológicos vão influenciar na perda de carga, velocidade de transporte e outras características inerentes ao processo de perfuração (THOMAS, 2001).

#### 2.1.2.3 Forças géis

Devido a natureza tixotrópica de alguns fluidos de perfuração, eles atingem um maior estado de rigidez quando em repouso e voltam a possuir um estado de maior fluidez quando são colocados novamente em movimento. A força gel inicial mede a resistência inicial do fluido para iniciar o fluxo, já a final mede a resistência para reiniciar o fluxo do fluido a partir de um determinado tempo em estado de repouso. A diferença entre a força gel inicial e final indica qual o grau de tixotropia do fluido (THOMAS, 2001).

#### 2.1.2.4 Parâmetros de filtração

Materiais sólidos adicionados no fluido de perfuração devem formar uma camada nos poros expostos de formações rochosas permeáveis presentes nos reservatórios de petróleo. Esta camada é denominada reboco, sendo fundamental para o sucesso da perfuração e completação do poço. O tamanho das partículas que causam esta obstrução é importante e devem ser ligeiramente menores que os poros da formação rochosa (THOMAS, 2001).

#### 2.1.2.5 Teor de sólidos

O teor de sólidos presentes no fluido de perfuração vai aumentando durante o processo de perfuração do poço, devido à presença de sólidos provenientes do corte das rochas na perfuração (CHARLES e SAYLE, 2010). O aumento no teor de sólidos causa variações nas propriedades do fluido, o que pode afetar a eficiência e segurança do processo. Para prevenir as mudanças nas características do fluido, deve-se realizar um tratamento preventivo neste, que consiste em estratégias como inibir química ou fisicamente o fluido, impedindo a dispersão dos sólidos perfurados. Tratamentos corretivos para extrair os sólidos presentes no fluido também são aplicados, através da utilização de equipamentos tais como

tanques de decantação, peneiras, hidrociclones, centrifugação, diluição (THOMAS, 2001, ASME, 2005).

#### 2.1.2.6 Correção hidrogeniônica – pH

O pH dos fluidos de perfuração deve ser controlado a fim de mantê-los num intervalo alcalino baixo, geralmente entre 7 a 10. O objetivo deste controle é evitar a corrosão de equipamentos assim como a dispersão de formações argilosas (THOMAS, 2001).

#### 2.1.2.7 Teor de cloretos ou salinidade

O teste de salinidade é realizado por meio de uma análise volumétrica de precipitação através da titulação de íons cloreto. Em campo, os resultados de salinidade são usados para identificar o teor salino da água de preparo do fluido, realizar o controle de salinidade de fluidos inibidos com sal, identificar a ocorrência de influxo de água salgada e a perfuração de uma rocha ou domo salino (THOMAS, 2001).

#### 2.1.2.8 Teste de bentonita ou sólidos ativos

O teste de azul de metileno ou MBT é uma análise volumétrica por adsorção utilizada para indicar a quantidade de sólidos ativos ou bentoníticos no fluido de perfuração, através da medida da capacidade de troca de cátion das argilas e sólidos ativos presentes (THOMAS, 2001).

### 2.1.3 Tipos de fluido de perfuração

O critério mais utilizado quanto à classificação do tipo de fluido de perfuração está relacionado ao componente principal que compõe a mistura (THOMAS, 2001). De acordo com este critério, os fluidos de perfuração podem ser classificados como fluidos a base aquosa, não aquosa ou gasosa (ASME, 2005). O fluido de base gasosa é uma prática pouco utilizada, por isso não será abordado neste texto. As fases dispersante e dispersa do fluido definem suas características e propriedades.

#### 2.1.3.1 Fluidos de base aquosa

Os fluidos de base aquosa possuem água como principal diluente, sendo que sua definição considera a natureza da água e os aditivos químicos empregados para compor o

fluido (THOMAS, 2001). Os componentes e a proporção entre eles definem as características físicas e químicas do fluido (CHARLES e SAYLE, 2010)

A água tem como função principal prover a dispersão dos materiais coloidais presentes no fluido, que consistem, principalmente, em argilas e polímeros, responsáveis por controlar a viscosidade, força géis e filtrado. Estas características são essenciais para garantir a estabilização do poço e remoção dos sólidos proveniente das rochas.

Diversos fatores são considerados na seleção da água para o preparo, tais como: disponibilidade, custo de transporte e tratamento, formações geológicas que serão perfuradas, produtos químicos utilizados na composição do fluido e equipamentos e técnicas para avaliar as formações (THOMAS, 2001).

#### 2.1.3.2 Fluidos de base não aquosa

Fluidos de base não aquosa possuem outros componentes principais para compor o diluente da fase contínua, geralmente composta por hidrocarbonetos de base sintética e não sintética. Dentre os tipos de fluidos de base não aquosa, há os que usam como base óleo como o diesel e outros óleos minerais e os que usam óleos sintéticos.

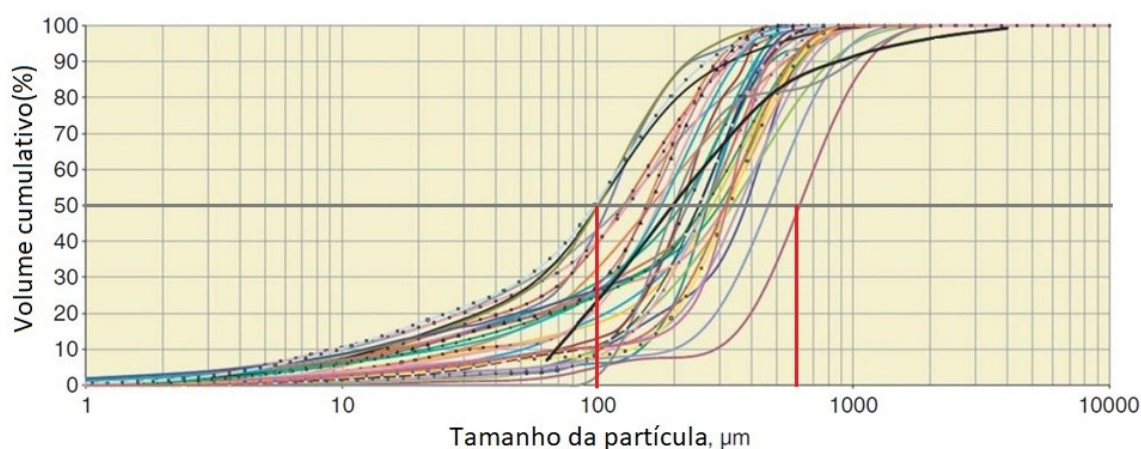
Devido ao alto custo e grau de poluição, fluidos a base óleo são menos utilizados em processos de perfuração (THOMAS, 2001). O nível de contaminantes ao meio ambiente e, conseqüentemente, a toxicidade do fluido, dependem de características como a concentração de compostos aromáticos, que estão presentes em maior quantidade na composição de fluidos em base óleo (CHARLES e SAYLE, 2010).

As vantagens na utilização deste tipo de fluido estão relacionadas com o maior grau de inibição em relação a rochas reativas, menor taxa de corrosão e melhor lubrificação. Algumas das desvantagens são as menores taxas de penetração, maior custo e dificuldade no controle da perda de circulação, sendo esse um grande problema na perfuração dos poços de petróleo (CALÇADA *et al*, 2015).

Atualmente, diversos fluidos a base óleo foram desenvolvidos promovendo alto grau de processamento de óleos minerais ou a produção de óleos sintéticos, que reduziram drasticamente a quantidade de compostos aromáticos em sua composição (CHARLES e SAYLE, 2010).

## 2.2 CASCALHOS PROVENIENTES DA PERFURAÇÃO DO POÇO

Os sólidos provenientes da perfuração das rochas durante o processo de perfuração do poço são denominados cascalhos. Os tipos de cascalhos gerados dependem da camada geológica sendo perfurada, variando quanto sua composição química e granulometria (AASE *et al*, 2013). Na Figura 2.1 é mostrada a variação da granulometria em relação ao poço perfurado, onde é possível observar que a variação do diâmetro da partícula para o volume cumulativo de 50% varia aproximadamente entre 100 e 600 $\mu$ m, de acordo com o poço sendo perfurado.



**Figura 2.1:** Variação na distribuição granulométrica dos sólidos de acordo com o poço perfurado (Fonte Aase *et al*, 2013).

Durante o processo de perfuração de um poço, os sólidos provenientes do corte das rochas é um dos grandes problemas relacionados à contaminação do fluido de perfuração (ADJIMAH, 2013). Estes sólidos mudam as propriedades físicas do fluido, prejudicando o processo de perfuração do poço e necessitam ser retirados para que o fluido retorne em condições adequadas para a perfuração. A separação do fluido de perfuração do cascalho é realizada na unidade de controle de sólidos

## 2.3 UNIDADE DE CONTROLE DE SÓLIDOS

Nas operações de perfuração de poços de petróleo, o fluido de perfuração é o responsável por remover e carrear à superfície os sólidos gerados pelo corte das rochas. A separação do fluido de perfuração destes sólidos é de grande importância, devido a fatores ambientais e econômicos, já que o fluido precisa ser reaproveitado no processo de perfuração

do poço e o descarte de sólidos deve conter um limite máximo de teor de compostos químicos orgânicos, devido sua toxicidade (CHARLES e SAYLE, 2010). A legislação varia de acordo com o país, mas a tendência é que a normas fiquem cada vez mais rígidas quanto a isso.

Para realizar a separação do fluido de perfuração do cascalho, é necessário o emprego da unidade de controle de sólidos, responsável por recondicionar o fluido às suas características necessárias ao processo de perfuração e limpar os sólidos de acordo com a necessidade de disposição final do cascalho contaminado pelo fluido.

Cada equipamento presente na unidade de controle de sólidos é responsável por separar uma faixa de tamanho do cascalho. Os principais equipamentos, tipicamente utilizados numa unidade deste tipo, são: peneiras vibratórias, hidrociclones (*mud cleaner*, desareiaadores e dessiltadores) e centrífugas decantadoras.

### **2.3.1 Peneira vibratória**

A peneira vibratória é o primeiro equipamento empregado na linha de controle de sólidos, sendo um equipamento fácil de usar e que oferece alto custo-benefício no processo. Seu funcionamento afeta todos os equipamentos subsequentes (ASME, 2005). O princípio de funcionamento da peneira vibratória está baseado no movimento de vibração, que favorece a passagem do líquido pela tela e o transporte dos sólidos retidos (AADE, 1999).

A mistura de fluido de perfuração com os cascalhos do poço passa primeiramente na peneira vibratória, separando os sólidos mais grosseiros que ficam retidos pela tela e os descarregando na seção de descarte do material retido. O material particulado mais fino e maior parte do fluido de perfuração passa pela tela e é direcionado aos outros equipamentos da unidade de controle de sólidos.

Este movimento é imposto pela ação dos motovibradores, e a intensidade da vibração é diretamente proporcional a frequência de rotação destes.

Há diferentes tipos de peneira, que também são classificadas de acordo com o tipo de movimento, entre estes pode-se citar: elíptico balanceado ou não, circular e linear.

A escolha da tela da peneira vibratória está relacionada ao tamanho dos sólidos que se deseja separar, geralmente todos os sólidos (cascalho) provenientes do processo de perfuração que possuem tamanho maior que 74  $\mu\text{m}$  são indesejados, por isso telas API 200 (~74  $\mu\text{m}$ ) são preferíveis para serem utilizadas (ASME, 2005). A Figura 2.2 mostra uma ilustração em escala de uma peneira vibratória industrial.





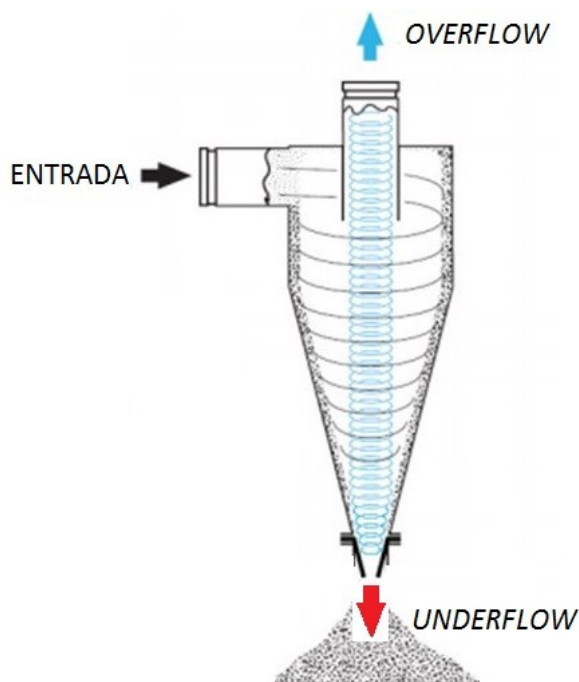
**Figura 2.2:** Peneira vibratória (fonte: MI-SWACO, 2017).

### 2.3.2 Hidrociclones

Os hidrociclones são os próximos equipamentos depois da peneira vibratória. São equipamentos simples, que não possuem partes móveis.

O funcionamento dos hidrociclones consiste na transformação da energia gerada por uma bomba centrífuga em força centrífuga, que acelera a sedimentação das partículas presentes na mistura alimentada, fazendo com que os sólidos sejam direcionados a uma saída (*underflow*) enquanto a parte líquida é direcionada a outra (*overflow*).

A forma dos hidrociclones consiste numa seção cilíndrica alimentada em sua parte superior através de uma seção de alimentação tangencial a sua parede, seguida por outra parte cônica logo abaixo. Na extremidade de menor raio da seção cônica fica o descarte dos sólidos (*underflow*), enquanto o descarte da parte líquida com sólidos mais finos é feita na parte superior da seção cilíndrica (*overflow*), através de uma saída nesta (ASME, 2005). A Figura 2.3 mostra o fluxo do material alimentado em um hidrociclone.



**Figura 2.3:** Esquema funcionamento hidrociclone (fonte: todoparaelriego.com, 2017).

O tipo e designação de hidrociclones numa unidade de controle de sólidos varia de acordo com faixa granulométrica que estes são responsáveis por separar, podendo ser divididos em: desareidores e dessiltadores. As proporções geométricas entre as partes do hidrociclone, o seu tamanho, pressão interna e taxa de alimentação definem a faixa de separação e a capacidade operacional do mesmo, como mostra a Tabela 2.1.

**Tabela 2.1:** Designação de hidrociclones de acordo com a faixa operacional.

Designação	Diâmetro do cone(in)	Capacidade de processamento(gpm)
Dessiltador	2	10 – 30
Dessiltador	4	50 – 65
Dessiltador	5	75 – 85
Desareizador	6	100 – 120
Desareizador	8	200 – 240
Desareizador	10	400 – 500
Desareizador	12	500 – 600

(Fonte: AADE, 1999)

Equipamentos denominados *mud-cleaner* também são utilizados em unidades de controle de sólidos. Eles consistem na combinação de hidrociclones e peneiras vibratórias de movimento linear que possuem telas com aberturas mais estreitas.

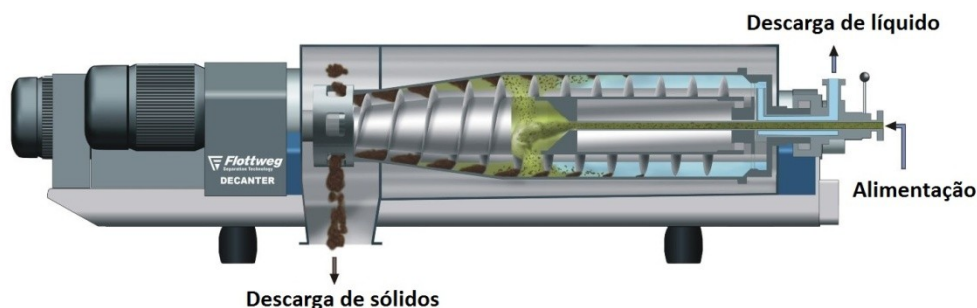
O equipamento recebe a mistura através dos hidrociclones, que descarregam o *underflow* sobre a tela de peneiramento. Esta mistura a ser separada pelo processo de peneiramento ainda possui uma boa parcela de fluido de perfuração juntamente com seus com a baritina e outros compostos que devem ser recuperados (AADE, 1999).

### 2.3.3 Centrífuga decantadora

O equipamento subsequente aos hidrociclones é a centrífuga.

As centrífugas decantadoras utilizam como princípio de separação a força centrífuga, através da aplicação de altas taxas de rotação.

O equipamento consiste num parafuso transportador dentro de um tambor rotativo acoplado a um motor que faz o sistema girar sobre o próprio eixo. Isso gera um campo de força centrífuga em seu interior que faz com que os sólidos sejam direcionados em direção a parede do tambor. O material majoritariamente formado por sólidos é dirigido a uma das saídas do equipamento, já a parte líquida é direcionada a outra saída, como mostra a Figura 2.4.



**Figura 2.4:** centrífuga decantadora (fonte: flottweg.com, 2015).

A velocidade de rotação do parafuso interno e do tambor são ligeiramente diferentes, sendo esta diferença essencial para o transporte dos sólidos (GUERREIRO, 2015).

## 2.4 DESCARTE DOS SÓLIDOS CONTAMINADOS

A presença de contaminantes no cascalho gerado pela atividade de perfuração de um poço faz com que haja uma legislação específica para o descarte destes resíduos. Os riscos associados ao meio ambiente são alvos de diversos estudos, assim como o desenvolvimento

de novas tecnologias que visam diminuir a toxicidade dos componentes do fluido de perfuração e melhorar o processo de limpeza do cascalho. Como são gerados diferentes tipos de resíduos, estes são classificados de acordo com o seu nível de toxicidade.

O descarte do cascalho contaminado geralmente segue três potenciais destinos (CHARLES E SAYLE, 2010):

Descarte *offshore*: o cascalho é descartado direto no mar, em zonas específicas, longe de recifes de corais ou locais que afetem a vida marinha ou captação de água.

Reinjeção em poços *offshore*: o cascalho é processado, ficando mais fino, sendo hidratado até atingir um estado para ser bombeado em formações geológicas abaixo da superfície, de modo a ficar aprisionado nestas formações.

Descarte *onshore*: o cascalho é trazido para terra firme, processado e descartado em locais onde a regulamentação ambiental permita, como aterros sanitários preparados para receber este tipo de resíduo.

## 2.5 PENEIRAMENTO VIBRATÓRIO

O processo de peneiramento vibratório é o alvo deste trabalho, e será discutido nesta seção.

A função da peneira vibratória no processo de perfuração de poços é separar a mistura do fluido de perfuração dos sólidos provenientes do corte das rochas. É o primeiro equipamento na linha de controle de sólidos (ASME, 2005).

A tela da peneira deve permitir a passagem dos sólidos que fazem parte da composição do fluido de perfuração, como a baritina, mas reter aqueles provenientes da perfuração do poço. A escolha adequada da tela leva em consideração fatores como o fato de que sólidos maiores que 74  $\mu\text{m}$  são indesejáveis no fluido (ASME, 2005), já que esta faixa de tamanho não engloba a granulometria de aditivos sólidos presentes na composição do fluido, sendo uma faixa de tamanho restrita ao cascalho da perfuração do poço.

A peneira vibratória é o equipamento mais importante e fácil de usar numa linha de controle de sólidos (ASME, 2005). Sua boa operação é de fundamental importância, visto que seu desempenho afeta todas as etapas posteriores na unidade de controle de sólidos.

Fatores reológicos, tipo de fluido de perfuração utilizado, tipos de sólidos a serem separados, temperatura, taxa de perfuração, interação sólido-líquido e outras variáveis ditam a capacidade operacional da peneira utilizada.

### **2.5.1 Funcionamento da peneira vibratória**

A mistura vinda do processo de perfuração do poço é direcionada ao tanque de alimentação presente no início da peneira. Este tanque possui um vertedouro que distribui a mistura por transbordamento de maneira homogênea no início da seção da tela (GUERREIRO, 2015).

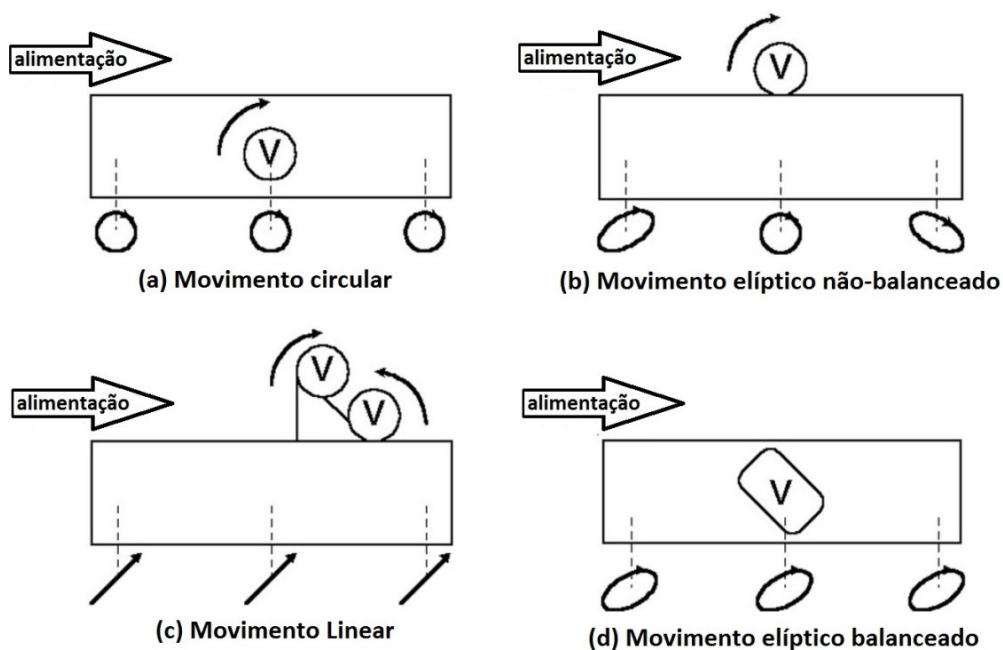
O princípio básico da separação sólido líquido em processo de peneiramento vibratório está relacionado ao tipo de movimento imposto pela peneira na mistura alimentada a ser separada.

Devido à ação dos motores vibratórios, a peneira vibra fazendo com que a mistura sobre a tela sofra a atuação de forças que favorecem a separação.

Quando a tela da peneira tem seu movimento direcionado para cima, devido à inércia, o fluido e os sólidos menores que a abertura tendem a passar pela tela, favorecendo a separação. Já quando o movimento da tela é direcionado para baixo, os sólidos retidos pela tela perdem o contato com esta, sendo lançados ao um ponto mais a frente, em direção ao descarte do material retido (ASME, 2005). Os movimentos gerados pelos motores na tela de peneiramento possuem, então, duas funções: favorecer a passagem do líquido pela tela e facilitar o transporte dos sólidos retidos.

O desempenho da peneira vibratória é afetado pelo tipo de movimento desta, os principais tipos de movimento são: elíptico, circular e linear.

Para as peneiras de movimento circular, há um único motovibrador colocado no centro de gravidade do cesto da peneira (Figura 2.5 a). Já quando o motovibrador é colocado acima do centro de gravidade do cesto, o movimento obtido é o elíptico não-balanceado (Figura 2.5 b). Com dois motovibradores funcionando em contra-rotação, produzem o movimento linear do cesto (Figura 2.5 c). Já quando os motovibradores são colocados com certo ângulo em relação ao cesto de peneiramento e funcionando em contra-rotação, é possível gerar o movimento elíptico balanceado (Figura 2.5 d)



**Figura 2.5:** Tipos de movimento de uma peneira vibratória (a) Circular (b) Elíptico não-balanceado (c) Linear (d) Elíptico balanceado (fonte: ASME 2005, modificada).

O movimento elíptico não balanceado originou-se nos anos da década de 1930. Este movimento afeta a região de descarga dos sólidos, pois o eixo maior do movimento elíptico tende a lançar os sólidos de volta a peneira, dificultando o descarte. A solução encontrada é a operação do equipamento com o cesto inclinado de forma descendente no sentido de deslocamento dos sólidos (ASME, 2005).

Já o movimento circular surgiu no ano de 1963 e favorece o transporte dos sólidos sobre a tela, resolvendo o problema da retenção dos sólidos sobre esta. Além disto, este de movimento possibilitou a utilização de mais de uma tela durante o processo de peneiramento (ASME, 2005).

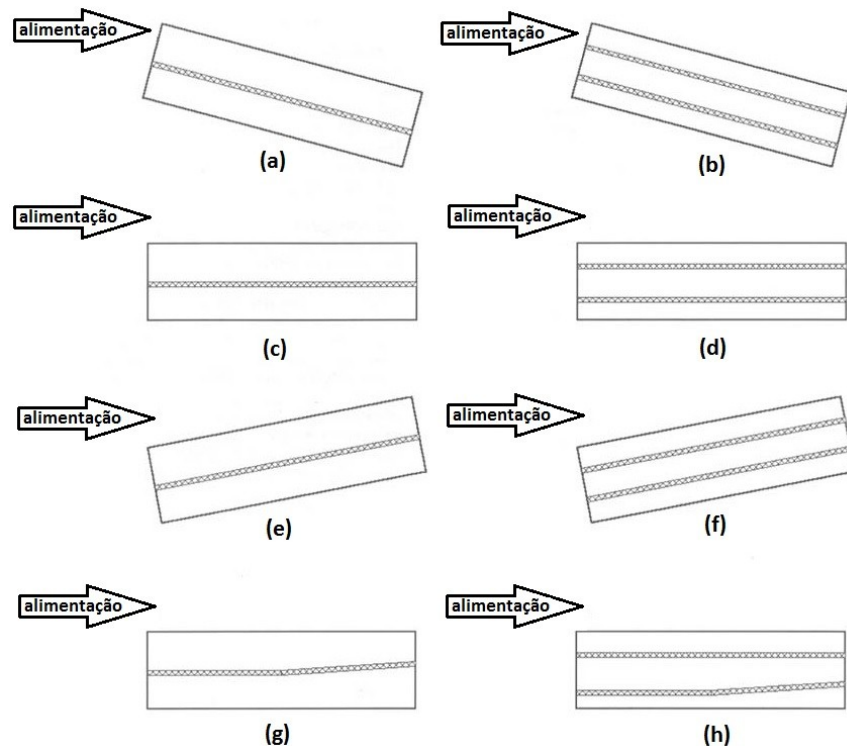
O movimento linear surgiu em 1983, assim como as telas de peneiramento com aberturas menores, como as API 200. Este tipo de movimento aumenta a passagem de líquido pela tela e garante um bom transporte dos sólidos, mesmo em inclinações mais altas, resolvendo um problema das peneiras elípticas não balanceadas e circulares (ASME, 2005).

O movimento elíptico balanceado surgiu em 1992. Ele garante boa eficiência de separação sólido-líquido e transporte dos sólidos retidos. Assim como no movimento linear, permite que a peneira opere em inclinações ascendentes em relação ao deslocamento dos sólidos. Devido a natureza menos abrupta do movimento imposto a tela em relação à mistura

a ser separada, o movimento elíptico balanceado causa menos desgaste as telas, aumentando sua vida útil (ASME, 2005).

A inclinação do cesto e o número de telas utilizadas numa peneira também podem variar de acordo com o modelo utilizado e a necessidade imposta pelo processo, sendo variáveis que afetam diretamente a eficiência de separação. Pode-se trabalhar com inclinações ascendentes, planas ou descendentes em relação ao deslocamento dos sólidos e também possuir mais de uma combinação de tela possível (Figura 2.6). Muitas peneiras disponíveis no mercado possuem sistema de regulação de inclinação.

A diferença em relação aos tipos de movimento da peneira e inclinação do cesto afeta diretamente a eficiência do peneiramento vibratório.



**Figura 2.6:** Inclinação e combinação de telas para peneiras vibratórias (a) declinado com um tela (b) declinado com duas telas (c) plano com uma tela (d) plano com duas telas (e) inclinado com uma tela (f) inclinado com duas telas (g) plano com uma tela e variação de inclinação da tela e (h) plano com duas telas e variação da inclinação da tela inferior (fonte:ASME, 2005, modificada).

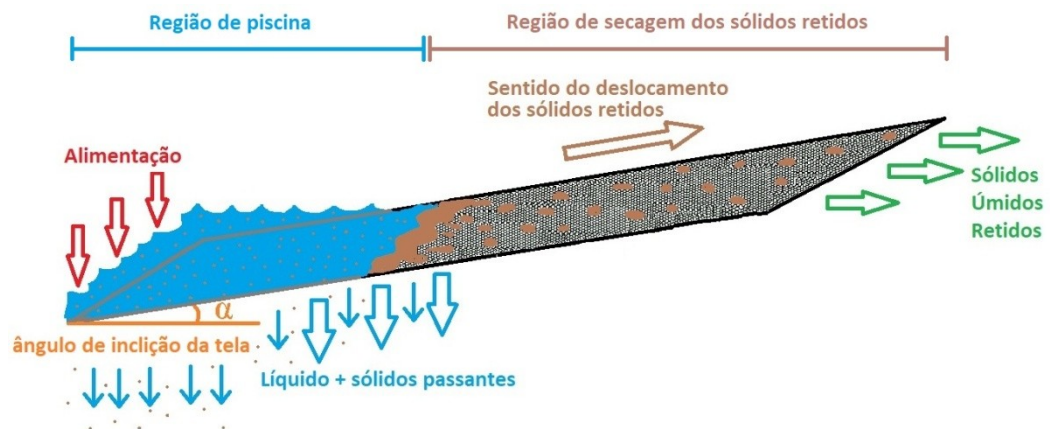
Devido às características do processo, o peneiramento vibratório aplicado a separação sólido-líquido possui duas diferentes regiões com comportamentos distintos sobre a tela de separação.



A primeira região, mais próxima da alimentação, é denominada região de líquido (DORRY, 2010, HOBEROCK, 1980) ou região de piscina (RAJA *et al*, 2012).

A segunda região, onde há o deslocamento dos sólidos retidos pela tela de peneiramento e denominada região de praia (DORRY e DUFILHO, 2012) ou região de secagem de sólidos, nome adotado neste trabalho.

A Figura 2.7 ilustra a formação destas duas regiões, alvos de análise do presente trabalho.



**Figura 2.7:** Ilustração das diferentes regiões envolvidas no processo de peneiramento vibratório.

## 2.5.2 Avaliação do desempenho do processo de peneiramento vibratório

### 2.5.2.1 Teor de umidade dos sólidos retidos

O teor de umidade dos sólidos retidos se refere a quanto de líquido saiu com os sólidos que não passaram pela tela da peneira durante o processo de peneiramento (DORRY, 2010). A variável do teor de umidade dos sólidos retidos é calculada em base úmida pela Equação (2.1):

$$U(\%) = 100 \frac{m_U - m_S}{m_U} \quad (2.1)$$

sendo  $U(\%)$  a umidade dos sólidos retidos em porcentagem mássica em base úmida,  $m_U$  a massa dos sólidos úmidos coletados e  $m_S$  a massa dos sólidos secos. O sólido úmido deve ser pesado logo após a coleta, para evitar a perda por evaporação do líquido ou algum componente presente neste. A secagem é realizada por tempo e temperatura suficiente para



que a massa de líquido seja totalmente evaporada, variando de acordo com o tipo de líquido que se deseja secar. Dorry (2010) realizou a secagem por tempo suficiente até que as massas das amostras parassem de variar, a uma temperatura de 180°C, realizando os testes em campo e laboratório com a utilização de fluido de perfuração. Já Guerreiro (2015) realizou seus testes com suspensão de rocha fosfática e água com goma xantana, o tempo de secagem adotado foi de 24 horas em estufa a 105°C.

#### 2.5.2.2 Eficiência de separação granulométrica

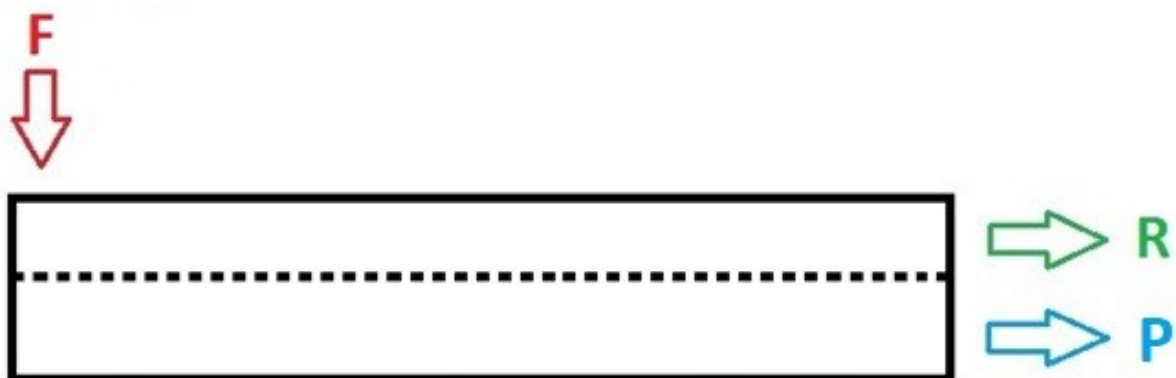
Idealmente, a separação granulométrica num processo de separação por peneiramento vibratório deveria contemplar a passagem de todas as partículas menores que a abertura e nenhuma maior que esta. Obviamente, em um processo real de peneiramento isto não é observado. Partículas maiores que a abertura da tela estão sujeitas a passar por excesso de material sobre a tela que força a passagem de partículas maiores, furos causados pelo tempo de uso do equipamento e má instalação dos painéis de tela (ASME, 2005).

Sendo assim, a separação granulométrica num processo de peneiramento vibratório real é diferente do ideal.

Nesta Seção será apresentado um método de cálculo para a eficiência granulométrica de separação com base nos trabalhos de Guerreiro (2015) e Larson (2007) e Freitas (2016).

A eficiência de separação granulométrica avalia o grau de proximidade de um processo real e um ideal. Através do balanço nas correntes de entrada e saída da peneira é possível avaliar a eficiência de separação granulométrica.

Tomando como base o fluxograma do processo de peneiramento apresentado pela Figura 2.8:



**Figura 2.8:** Fluxograma de separação de peneiramento.

Levando em consideração as correntes de entrada e saída do fluxograma e realizando um balanço de massa apresentado na Equação (2.2).

$$F = R + P \quad (2.2)$$

sendo  $F$  a corrente de alimentação,  $R$  a corrente de material retido pela tela de peneiramento e  $P$  a corrente de material passante. Considerando só a fração sólida da mistura para o balanço de sólidos no processo, apresentado na Equação (2.3).

$$x_F F = x_R R + x_P P \quad (2.3)$$

sendo  $x_F$  a fração de sólidos na alimentação,  $x_R$  a fração de sólidos na corrente de sólidos retidos e  $x_P$  a fração de sólidos na corrente de material passante. Dividindo a Equação (2.3) pela fração de sólidos na alimentação, é obtido a Equação (2.4):

$$\frac{x_F F}{x_F F} = \frac{x_R R}{x_F F} + \frac{x_P P}{x_F F} \quad (2.4)$$

logo,

$$1 = \frac{x_R R}{x_F F} + \frac{x_P P}{x_F F} \quad (2.5)$$

Definindo o termo  $E_P$  como a razão entre a quantidade de sólidos que passam pela tela e alimentados e  $E_R$  como a razão entre a quantidade de sólidos retidos pela tela e alimentados, respectivamente:

$$E_P = \frac{x_P P}{x_F F} \quad (2.6)$$

e

$$E_R = \frac{x_R R}{x_F F} \quad (2.7)$$

Assim, devido ao balanço global dos sólidos, é obtida a Equação (2.8):

$$E_R + E_P = 1 \quad (2.8)$$

Para calcular o balanço de sólidos de acordo com uma determinada faixa granulométrica, relaciona-se a faixa de tamanho destas partículas na alimentação com a mesma faixa de tamanho de partículas nas correntes de material retido e passante, conforme apresentado na Equação (2.9):

$$x_F F \frac{dY_F}{d(d_p)} = x_R R \frac{dY_R}{d(d_p)} + x_P U \frac{dY_P}{d(d_p)} \quad (2.9)$$

sendo  $\frac{dY_F}{d(d_p)}$ ,  $\frac{dY_R}{d(d_p)}$  e  $\frac{dY_P}{d(d_p)}$  as distribuições de frequência em massa das partículas com determinada faixa de tamanho  $d_p$  na alimentação, material retido e material passante, respectivamente. O conhecimento de como se dá a divisão destas partículas no material retido e passante a partir da alimentação é importante para os cálculos da eficiência de separação granulométrica.

Dividindo a Equação (2.9), pelo termo  $x_F F \frac{dY_F}{d(d_p)}$ , é obtido a Equação (2.10):

$$\frac{x_F F \frac{dY_F}{d(d_p)}}{x_F F \frac{dY_F}{d(d_p)}} = \frac{x_R R \frac{dY_R}{d(d_p)}}{x_F F \frac{dY_F}{d(d_p)}} + \frac{x_P P \frac{dY_P}{d(d_p)}}{x_F F \frac{dY_F}{d(d_p)}} \quad (2.10)$$

logo,

$$1 = \frac{x_R R \frac{dY_R}{d(d_p)}}{x_F F \frac{dY_F}{d(d_p)}} + \frac{x_P P \frac{dY_P}{d(d_p)}}{x_F F \frac{dY_F}{d(d_p)}} \quad (2.11)$$

Através da substituição dos termos  $E_U$  e  $E_R$  apresentados nas Equações (2.6) e (2.7), respectivamente, na Equação (2.11), é apresentada a Equação (2.12):

$$1 = E_R \frac{\frac{dY_R}{d(d_p)}}{\frac{dY_F}{d(d_p)}} + E_P \frac{\frac{dY_P}{d(d_p)}}{\frac{dY_F}{d(d_p)}} \quad (2.12)$$

O primeiro termo da Equação (2.12) é definido como eficiência granulométrica de coleta de partículas de tamanho  $d_p$ , ou grade de separação do material sólido retido, representado pelo termo  $G_R$ .

$$G_R = E_R \frac{\frac{dY_R}{d(d_p)}}{\frac{dY_F}{d(d_p)}} \quad (2.13)$$

A eficiência de separação dos sólidos em processo de peneiramento vibratório pode variar dependendo da distribuição granulométrica na alimentação (GUERREIRO *et al*, 2017). Para o cálculo da eficiência granulométrica de separação é levado em conta as correntes de alimentação, material retido e material passante (LARSON, 2007). Para a corrente de material passante, a eficiência de separação granulométrica é apresentada pela Equação (2.14):

$$\eta_P = \frac{x_P P Y_P(d_p \rightarrow \phi)}{x_F F Y_F(d_p \rightarrow \phi)} \quad (2.14)$$

sendo  $\phi$  o tamanho da abertura da tela. O termo  $Y_P(d_p \rightarrow \phi)$  representa a distribuição cumulativa das partículas menores que  $\phi$  nos sólidos passantes. Já  $Y_F(d_p \rightarrow \phi)$  representa a distribuição cumulativa dos sólidos na alimentação menores que a abertura da tela.

Já para a corrente de material retido, a eficiência de separação granulométrica é apresentada pela Equação (2.15):

$$\eta_R = \frac{x_R R[1 - Y_R(d_p \rightarrow \phi)]}{x_F F[1 - Y_F(d_p \rightarrow \phi)]} \quad (2.15)$$

Para o cálculo da eficiência global de separação granulométrica, é necessário levar em conta as correntes de material retido e passante. Sendo assim, as Equações (2.14) e (2.15) são somadas, resultando na Equação (2.16):

$$\eta = \frac{x_P P Y_P(d_p \rightarrow \phi)}{x_F F} + \frac{x_R R[1 - Y_R(d_p \rightarrow \phi)]}{x_F F} \quad (2.16)$$

Substituindo as Equações (2.6) e (2.7) na (2.16):

$$\eta = E_P Y_P(d_p \rightarrow \phi) + E_R [1 - Y_R(d_p \rightarrow \phi)] \quad (2.17)$$

que é a eficiência global de separação dos sólidos levando em conta a granulometria do material particulado alimentado.

### 2.5.3 Variáveis operacionais no peneiramento vibratório

#### 2.5.3.1 Vibração (Força-g)

O efeito de vibração consiste em oscilações mecânicas com altas frequências de rotação e relativamente pequenas amplitudes, gerando um efeito que muda o comportamento de um leito de partículas (GOLOVANEVSKIY *et al*, 2011)

A intensidade da rotação dos motovibradores e massa de seu corpo excêntrico, mostrado na Figura 2.9, juntamente com outras características como a massa do cesto de peneiramento, ditam como a força é imposta ao material a ser separado.

Um parâmetro importante relacionado à intensidade de vibração é a amplitude do movimento, que pode ser representada pela Equação (2.18):

$$A = \frac{we}{W} \quad (2.18)$$

sendo  $A$  a amplitude do movimento,  $w$  a massa do corpo excêntrico,  $e$  definida como a excentricidade e  $W$  a massa do cesto.



**Figura 2.9:** Corpo excêntrico de um motovibrador (fonte: *Cleveland Vibrator Company*).

Utilizando a segunda lei de Newton, Equação (2.19):

$$F = Wa \quad (2.19)$$

sendo  $F$  a força aplicada e  $a$  a aceleração imposta ao cesto

Como o movimento é vibratório, há um ponto de máximo da força, onde esta atinge um pico durante o movimento que é associado a uma determinada aceleração, assim:

$$F_p = Wa_p \quad (2.20)$$

sendo  $F_p$  a força de pico e  $a_p$  a aceleração associada à força de pico.

A equação do movimento da peneira em relação ao tempo para o movimento vertical desta pode ser descrita pela Equação (2.21):

$$S = A \sin(2\pi ft) \quad (2.21)$$

sendo  $S$  o deslocamento,  $f$  a frequência de vibração e  $t$  o tempo.

A aceleração resultante do movimento da peneira é obtida através do módulo da segunda derivada da Equação (2.21), obtemos assim:

$$\frac{d^2S}{dt^2} = a = A(2\pi f)^2 \text{sen}(2\pi ft) \quad (2.22)$$

Para o valor de pico em módulo da aceleração,  $a_p$ , podemos observar na Equação (2.22) que este valor só ocorre quando o termo contendo o seno atinge o valor 1, assim:

$$a_p = A(2\pi f)^2 \quad (2.23)$$

Substituindo as Equações (2.23) e (2.18) na (2.20), tem-se:

$$F_p = we(2\pi f)^2 \quad (2.24)$$

Através da análise da Equação (2.24), pode-se concluir que a intensidade da força só depende da frequência de vibração, massa do corpo excêntrico e excentricidade.

Na literatura, uma forma usual de se medir a intensidade de vibração é através da força-g, que é definida pela razão entre a aceleração imposta pelos motovibradores e a aceleração da gravidade, apresentada pela Equação (2.25):

$$F_g = \frac{A(2\pi f)^2}{g} \quad (2.25)$$

Na Equação (2.25), é possível observar que a força-g é diretamente proporcional a amplitude e frequência de vibração do cesto. Analisando a Equação (2.18), pode-se observar que aumentando a massa sobre o cesto ( $W$ ) a amplitude diminui. Para manter o valor da força-g constante durante os experimentos, fazendo com que os sólidos estejam sujeitos a mesma intensidade de aceleração, independentemente da massa sobre o cesto, é necessário a implementação de um sistema de controle de força-g que altera o valor deste manipulando a frequência de rotação dos motores.

Dorry (2010) demonstrou como o sistema de controle de força-g está relacionado com a capacidade de operação da peneira e a importância deste tipo de controle. Em seus

experimentos, foi avaliado como a velocidade transporte varia de acordo com a força-g aplicada.

Já Yin *et al* (2016) realizaram seu trabalho simulando uma peneira vibratória através do método dos elementos discretos, onde o aumento da frequência de vibração gerou um aumento da velocidade de transporte dos sólidos, condizente com o esperado em sistemas reais.

#### 2.5.3.2 Concentração volumétrica de sólidos

A concentração volumétrica de sólidos na corrente de alimentação é um dos fatores associados à capacidade operacional da peneira vibratória (ASME, 2005). A quantidade de sólido alimentado afeta o tamanho de regiões específicas da peneira, como a região de piscina e de secagem dos sólidos retidos, tendo relação direta com a taxa de passagem de líquido na região de piscina. Isso ocorre porque o líquido sofre resistência ao escoamento durante a passagem pelo leito de sólidos retidos pela tela na região de piscina (RAJA *et al*, 2012).

O comportamento dos sólidos varia de acordo com outras variáveis, como a vibração, que altera o comportamento do leito (MAKINDE *et al*, 2015).

A eficiência do deságüe da separação sólido-líquido vai depender da distribuição de tamanho destas partículas, além de variáveis como a vibração, que induz os sólidos a se moverem pela tela, saindo da região de inundação e indo para a de secagem de sólidos (KING, 2001).

#### 2.5.3.3 Vazão de alimentação

Raja *et al* (2012) constataram experimentalmente que a altura da piscina aumenta com o aumento da vazão de alimentação. Dorry (2010) demonstrou que a desaceleração do cesto afeta a capacidade de processamento da vazão de alimentação na peneira e a importância de um sistema de controle de força-g para conter o avanço do líquido sobre a tela.

Isto é importante para quando se trabalha com vazões mais altas, fato também relacionado ao trabalho de Hoberock (1980), que concluiu que a capacidade de processamento da peneira vibratória para altas vazões de alimentação aumenta com o aumento da força-g.

Já Rogers e Brame (1985) avaliaram que a vazão é pouco influente na eficiência de separação dos sólidos.



#### 2.5.3.4 Inclinação da tela de peneiramento

A inclinação do cesto afeta o tamanho da região de piscina, sendo que a área ocupada pelo líquido é importante para garantir a boa lubrificação da tela, aumentando sua vida útil (DORRY, 2010).

Scott (2006) implementou um sistema de controle de inclinação do cesto e força-g, alimentado pela medida de diversas variáveis de processo. O objetivo era garantir uma área de ocupação adequada pela região de líquido sobre a tela e, ao mesmo tempo, manter a região de líquido longe da descarga dos sólidos retidos pela peneira. Quando a vazão de alimentação aumentava, o cesto inclinava, garantindo que fluido não fosse perdido na região de descarga de sólidos, já quando a vazão de alimentação diminuía, a inclinação da peneira diminuía, a fim de manter a tela lubrificada.

A inclinação da tela também está relacionada com o transporte dos sólidos e capacidade de passagem do líquido através desta. Telas com inclinação descendente fazem com que os sólidos tenham um favorecimento em relação ao deslocamento para o ponto de descarte, porém prejudica a passagem do líquido, fazendo com que este avance mais sobre a tela, podendo sair pela região de descarte dos sólidos secos e afetando o processo de separação (ASME, 2005).

Já inclinações positivas facilitam a passagem de fluido pela tela, já que há a formação de região de piscina, porém oferecem resistência ao deslocamento dos sólidos. Este aumento na resistência diminui a vida útil da tela (ASME, 2005).

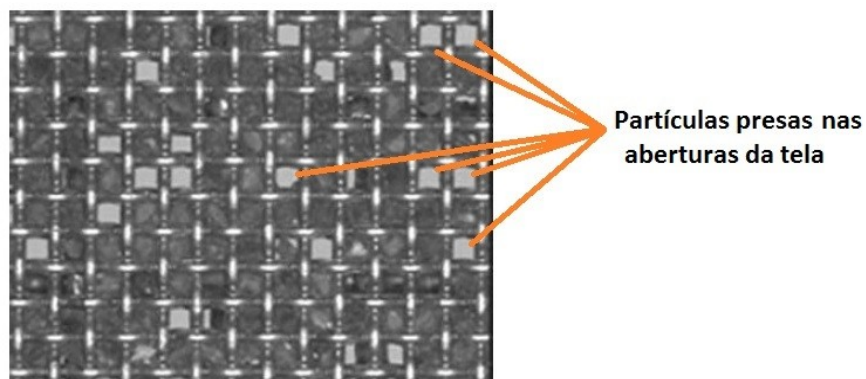
Fatores relacionados com a capacidade operacional da peneira vibratória também estão diretamente relacionados com a inclinação do cesto, que afeta diretamente a formação de região de piscina, influenciando na capacidade operacional da peneira vibratória.

#### 2.5.3.5 Abertura da tela de peneiramento

A abertura da tela de peneiramento é uma variável que deve estar diretamente relacionada à granulometria do material que se deseja separar. Em processos de perfuração de poços de petróleo, uma escolha usual é a tela API 200, que está relacionada ao tamanho dos aditivos sólidos utilizados no fluido de perfuração, que são menores que esta abertura, o que possibilita sua recuperação juntamente com o líquido passante (ASME, 2005).

Fenômenos como o entupimento das aberturas da tela, denominado *blinding*, também estão relacionados com o tamanho de abertura e das partículas a serem separadas. Quando a abertura da tela é próximo do tamanho das partículas, estas podem ficar presas, diminuindo a

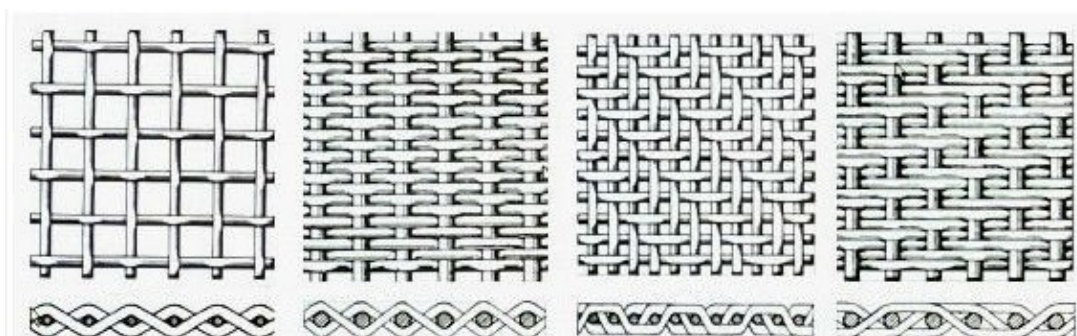
área efetiva de separação (HOBEROCK, 1980). A Figura 2.10 mostra diversas partículas presas nas aberturas da tela da peneira.



**Figura 2.10:** Partículas presas nas aberturas de uma tela de peneiramento (*blinding*) (fonte ASME, 2005).

As características da mistura também devem ser levadas em contas na escolha da tela, já que muitos aditivos presentes em fluidos de perfuração dificultam o processo de peneiramento vibratório, aumentam o valor de variáveis como a força gel e limitam a utilização de determinadas telas devido ao tamanho de suas aberturas (ASME, 2005)

A forma da abertura e a resistência que as telas oferecem a passagem das partículas e do líquido podem mudar. Diferentes tecnologias de fabricação e trama das linhas na tela mudam de acordo com o fabricante e tecnologias dos fios da tela (Figura 2.11).



**Figura 2.11:** Diferentes arranjos de trama e espessuras de fio de uma tela de peneiramento.

A contagem do número de aberturas da tela por polegada de comprimento linear na direção dos fios da trama é denominada *mesh*. Uma tela com 60 *mesh*, por exemplo, possui 60 aberturas por polegada linear em determinada direção. Já uma tela 60x20 *mesh*, possui 60

aberturas por polegada linear numa direção e 20 aberturas na direção perpendicular, também por polegada linear (ASME, 2005).

Telas com mesmo *mesh* podem variar uma em relação à outra, dependendo de características como a espessura do fio da trama.

O tamanho da abertura da tela pode ser calculado levando em conta o *mesh* e o diâmetro do fio da tela, pela Equação (2.26):

$$\phi = 25,400 \left( \frac{1}{n} - d \right) \quad (2.26)$$

sendo  $\phi$  o tamanho da abertura da tela,  $n$  o número de aberturas por polegada linear de tela numa direção (*mesh*) e  $d$  o diâmetro da espessura do fio da tela.

Já para o cálculo da porcentagem de área de tela não bloqueada pelos fios desta, usa-se a Equação (2.27):

$$P = \frac{\phi_x \phi_y 100}{(\phi_x + D)(\phi_y + d)} \quad (2.27)$$

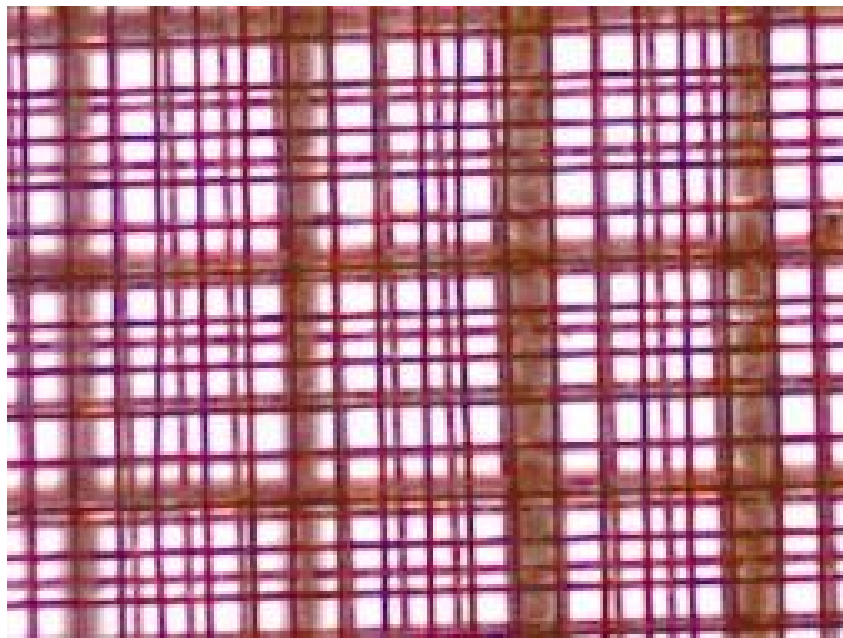
sendo  $\phi_x$  o tamanho da abertura da tela na direção  $x$ ,  $\phi_y$  o tamanho da abertura da tela na direção  $y$  (perpendicular a  $x$ ),  $D$  o diâmetro do fio na direção  $x$  e  $d$  o diâmetro do fio na direção  $y$ .

Há também telas multicamadas, compostas por duas ou três camadas de malha com fios e tramas diferentes, comumente utilizadas em peneiras presentes no controle de sólidos em processos de perfuração de poços de petróleo. A classificação deste tipo de tela não é simples, e segue diversos parâmetros (ASME, 2005), tais como:

Designação do fabricante: o fabricante pode nomear certa tela de acordo com as características que propõe serem adequadas. Estas designações são utilizadas para denominar determinadas características particulares da tela de peneiramento.

Número API: a classificação das telas se torna complicada quando estas são feitas por múltiplas camadas, pois dependendo da tecnologia associada à trama e materiais dos fios,

haverá diferentes formas de aberturas, que variam também de acordo com o fabricante (ASME, 2005). A Figura 2.12 mostra uma tela multicamada.



**Figura 2.12:** Tela multicamada (fonte: *Oil & Gas Journal web site*).

A necessidade de suprir este empecilho em torno da classificação das telas, fez com que surgisse a classificação em API. Atualmente, a norma em vigor é a API RP 13C.

A norma API tem como um dos parâmetros o D100, que se refere ao menor tamanho de partícula que é 100% retido pela tela, qualquer partícula de tamanho menor deve passar pela tela.

Condutância: a condutância da tela é um parâmetro relacionado com o fluxo de líquido que passa através da tela. Ela é análoga a permeabilidade por unidade de espessura de tela  $C = k(\text{Darcy}) / l(\text{cm})$  (ASME, 2005).

Para o cálculo da condutância, pode-se utilizar a Equação (2.28):

$$C = k / l = \frac{V\mu}{\Delta p} = \frac{Q\mu}{A\Delta p} \quad (2.28)$$

sendo

$$Q = VA \quad (2.29)$$

em que  $Q$  ( $cm^3/s$ ) é o fluxo,  $V$  ( $cm/s$ ) é a velocidade de passagem do fluido,  $A$  ( $cm^2$ ) é a área da tela,  $\Delta p$  ( $atm$ ) é a queda de pressão através da tela,  $\mu$  ( $cP$ ) é a viscosidade do fluido,  $l$  ( $cm$ ) é a espessura da tela,  $k$  ( $Darcy$ ) a permeabilidade e  $C$  ( $Darcy/cm$ ) a condutância.

Embora haja os parâmetros apresentados para a classificação das telas apresentados, a discussão sobre como sempre é alvo de estudos entre especialistas, sendo a norma API 13C RC datada de 2004.

Trabalhos anteriores a esta norma já propuseram a utilização de análise de imagem para a classificação de telas (CUTT, 1991)

#### 2.5.3.6 Propriedades reológicas do fluido

O fluxo de passagem do fluido pela tela está diretamente relacionado às suas características reológicas. O aumento da força gel, por exemplo, faz com que este tenha mais dificuldade de permear a tela de peneiramento (ASME, 2005).

Raja *et al* (2012) constatou que o aumento na viscosidade do fluido diminui a capacidade de processamento na peneira vibratória, pois há maior resistência para este atravessar a tela.

A presença de aditivos no fluido também pode afetar o processo de peneiramento vibratório, pois mudam as características do fluido.

#### 2.5.3.7 Granulometria dos sólidos

A distribuição, forma e concentração das partículas influem bastante no processo de peneiramento vibratório, tendo um efeito significativo na capacidade de processamento tanto do líquido quanto do sólido (ASME, 2005).

Como partículas menores que a abertura não passam pela tela, quanto maior a quantidade destas, menor a chance de partículas menores serem coletadas e maior a quantidade de sólidos sobre a tela na região de piscina, o que aumenta a resistência para a passagem do líquido e a altura da piscina.

A presença de muitas partículas com tamanho próximo ao da abertura da tela é ruim para o processo, já que estas podem entupir a passagem as aberturas da tela, diminuindo a área efetiva de peneiramento (HOBROCK, 1980).

## 2.6 ANÁLISE DE IMAGEM

A utilização da análise de imagens digitais é uma ferramenta que vem crescendo muito nos últimos anos. Câmeras digitais e computadores são dispositivos muito comuns atualmente e os métodos de análise através do processamento digital de imagens são muito convenientes para determinadas aplicações (ABHIK, 2017).

Embora o olho humano só consiga captar as ondas eletromagnéticas dentro do espectro visível, sensores mais apurados podem captar ondas no espectro não visível, como o infravermelho. Também podem associar a imagens sinais captados por sensores de outras fontes não eletromagnéticas, como o ultrassom, microscopia eletromagnética de varredura e ressonância magnética (GONZALEZ e WOODS, 2009).

Em alguns tipos de processos industriais, a análise de imagens obtidas através da gravação de um fenômeno físico envolvido na operação é de grande valia para quantificar e identificar certos tipos de respostas e comportamentos de variáveis operacionais. A importância disso se deve ao fato de que, muitas vezes, é inviável medir determinadas variáveis por outros tipos de sensores, seja por restrições operacionais ou econômicas.

Métodos que envolvem a análise de imagens obtidas através de câmeras convencionais são relativamente baratos quando comparados com a utilização de outros tipos de sensores físicos (ABHIK, 2017).

A análise de imagens associada a algoritmos computacionais que envolvem ferramentas como inteligência artificial e quantificação automática de medidas tem se tornado cada vez mais comum na indústria. Isso oferece uma base para que sejam tomadas melhores decisões ou, até mesmo, permitindo a intervenção automática de sistemas de controle baseados na análise de imagens do processo.

Quando se trata de visão computacional, a meta é utilizar os computadores para emular a visão humana, incluindo o aprendizado e a capacidade de fazer inferências e agir com base em informações visuais (GONZALEZ e WOODS, 2009).

Técnicas de análise de imagem aplicadas em peneiramento vibratório em processos de perfuração de poços de petróleo podem ser citadas como exemplo. Guilherme *et al* (2011) realizaram um trabalho onde o objetivo era medir a estabilidade de um poço de petróleo a partir de imagens coletadas na operação da peneira vibratória. Dependendo da quantidade de sólidos retidos e das mudanças na proporção sólido-líquido que chegava à peneira vibratória, o sistema de visão computacional associado a um algoritmo de inteligência artificial baseado

em redes neurais, alertava sobre possíveis problemas associados a estabilidade das paredes do poço sendo perfurado.

Já Khojasteh *et al* (2015) utilizaram lógica *fuzzy c-mean* aplicada na análise de imagens para determinação do tipo de formações rochosas perfuradas pela broca durante a perfuração de poços de petróleo.

Liao e Tarng (2009) utilizaram a análise de imagens digitais como ferramenta para medir a distribuição granulométrica dos sólidos de forma automática, problema recorrente na indústria em processos de separação e beneficiamento envolvendo material particulado.

### 2.6.1 Processamento digital de imagens

Para realizar o processamento digital de imagens é necessário fazer a escolha das imagens digitais onde será feita a análise. As imagens podem ser provenientes de um processo sendo gravado e monitorado em tempo real ou através de um banco de dados.

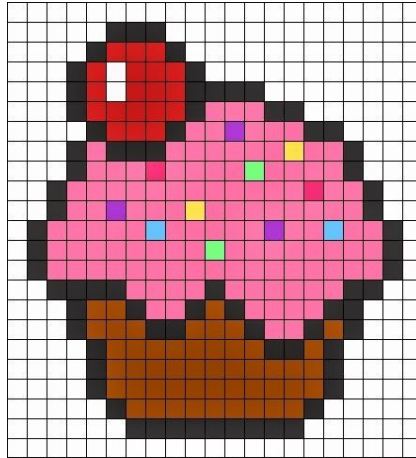
Além disso, uma imagem pode ser obtida de forma estática (foto) ou gravação em vídeo.

Pode-se dizer que uma imagem estática é uma imagem única, sem variações de forma com o tempo, já um vídeo é um conjunto de imagens estáticas denominadas *frames* ou quadros, executados de forma sequencial em ordem pré-estabelecida, com execução de uma determinada quantidade de *frames* por segundo, fazendo com que haja percepção dinâmica de movimentos e mudanças no conjunto de frames executado.

#### 2.6.1.1 Pixels

Uma imagem digital é formada por um conjunto finito de elementos que possuem localização e valores específicos, denominados *pixels*.

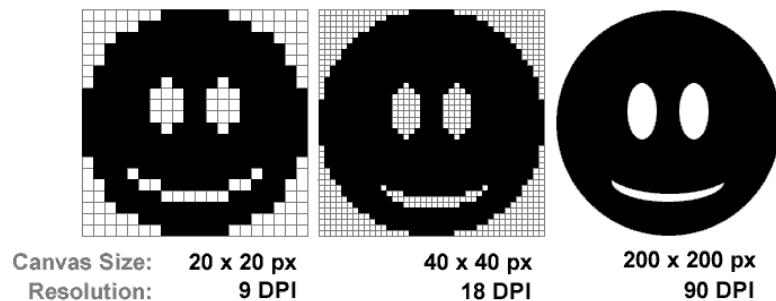
Cada pixel é elemento finito e uniforme, associado a um único valor de tonalidade, a Figura 2.13 ilustra como os pixels são responsáveis por formar uma imagem.



**Figura 2.13:** Pixels formando uma figura (fonte: pinterest).

### 2.6.1.2 Resolução

A resolução pode ser expressa como o número de pixels por unidade de distância, sendo que quanto maior a resolução de uma imagem, maior é a quantidade de pixels que a definem. Na Figura 2.14 é mostrado como ocorre a variação na resolução de uma imagem em relação ao número de pixels.



**Figura 2.14:** Variação de resolução com o número de pixels.

A resolução também pode ser avaliada de acordo com o número de linhas por unidade de distância. Uma resolução 1920x1080, por exemplo, significa 1920 linhas verticais de resolução horizontal e 1080 linhas horizontais de resolução vertical.

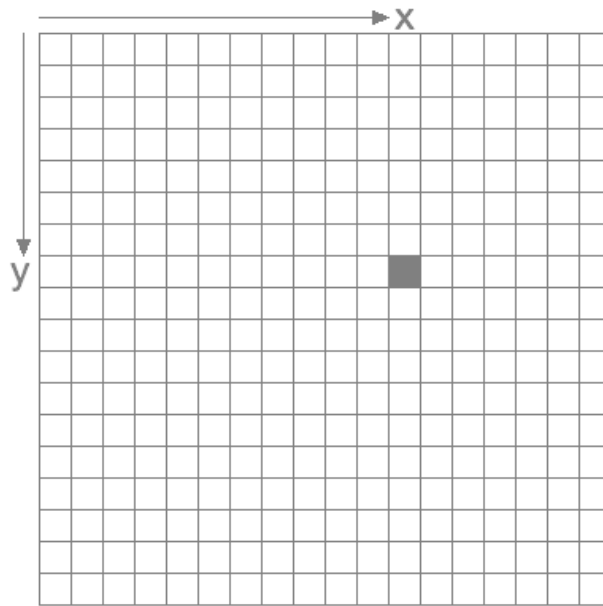
Assim, o número de pixels na imagem é 1920 vezes 1080, dando um total de 2073600 pixels, em potência de dez, tem-se  $\sim 2,1 \times 10^6$ , ou 2,1 mega pixels.

Quanto maior a resolução de uma imagem, maior será o nível dos detalhes perceptíveis nela.



### 2.6.1.3 Medida de distância entre pixels

Uma imagem digital pode ser definida como uma função bidimensional  $f(x,y)$ , onde  $x$  e  $y$  são coordenadas espaciais no plano, sendo a amplitude  $f$  para os pares de  $(x,y)$  chamada de intensidade ou o nível de cinza da imagem neste ponto (GONZALEZ e WOODS, 2009). Cada pixel possui uma coordenada própria na imagem, que define sua posição em relação a outros pixels, como mostra a Figura 2.15.



**Figura 2.15:** Coordenada pixel (fonte: *Criative Computation*).

A distância  $L$  entre dois pixels  $p$  e  $q$  com coordenadas  $(x,y)$  e  $(s,t)$  num plano cartesiano respectivamente, pode ser calculada pela Equação (2.30) (GONZALEZ e WOODS, 2009):

$$L(p,q) = \left[ (x-s)^2 + (y-t)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.30)$$

A distância em unidades digitais, calculadas em distância entre pixels, pode ser associada a uma escala real conhecida na mesma imagem. A partir da relação entre a distância digital e a medida real, é possível medir outros objetos presentes numa imagem, como ilustrado na Figura 2.16.



**Figura 2.16:** Relação da medida real e número de pixels.

Esse tipo de análise se mostra muito útil em processos que envolvem análise de fenômenos reais a partir de imagens, onde muitas vezes outras formas de medidas são inviáveis ou difíceis de serem executadas.

A aplicação deste tipo de técnica é feita em processos industriais, análises clínicas e até mesmo em perícias criminalísticas.

#### 2.6.1.4 Cor

Pixels podem variar de acordo com os níveis de cor ou tonalidades diferentes que possuem. Em virtude de considerações relacionadas a *hardwares* no processo de armazenamento de imagens e quantização, a quantidade de tonalidades que uma imagem pode apresentar é relacionada costuma ser apresentado como uma potência de 2, sendo  $T$  o número de tonalidades ou cores possíveis, como apresentado na Equação (2.31):

$$T = 2^k \quad (2.31)$$

sendo  $k$  é o número de bits. Assim, para uma imagem de 8 bits há 256 tonalidades ou cores diferentes, que são valores discretos associados aos pixels.

Há também imagens com 16 bits, utilizadas quando é necessária maior diferenciação entre as tonalidades ou cores. Já imagens com 32 bits são pouco usuais, sendo utilizadas para aplicações muito específicas (GONZALEZ e WOODS, 2009).

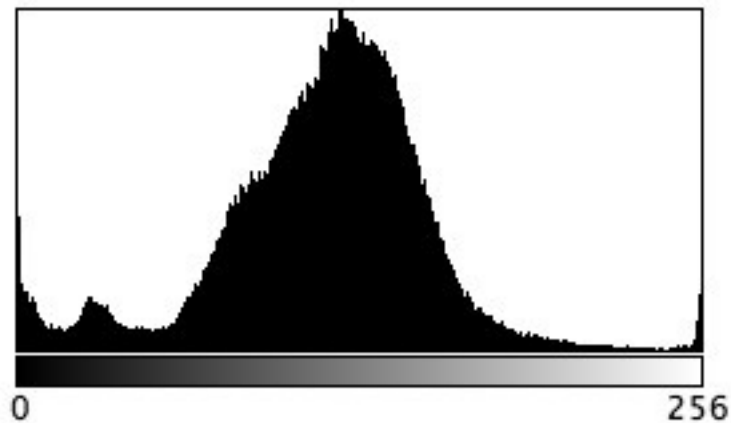
### 2.6.1.5 Histograma

O histograma de uma imagem digital com  $T$  níveis de tonalidade num intervalo  $[0, T-1]$  é uma função discreta onde:

$$h(r_k) = n_k \quad (2.32)$$

sendo  $r_k$  o  $k$ -ésimo valor de tonalidade, e  $n_k$  o número de pixels da imagem com intensidade  $r_k$ . Cada nível discreto de intensidade é associado a uma cor ou tonalidade de cinza.

A distribuição de frequência destes pixels pode ser colocada na forma de um histograma, como mostra a Figura 2.17 para 256 tons de cores.



**Figura 2.17:** Histograma de frequência de pixels.

Assim, é possível visualizar a frequência dos pixels de forma gráfica associada aos níveis discretos de cada tonalidade possível para o número de bits da imagem.

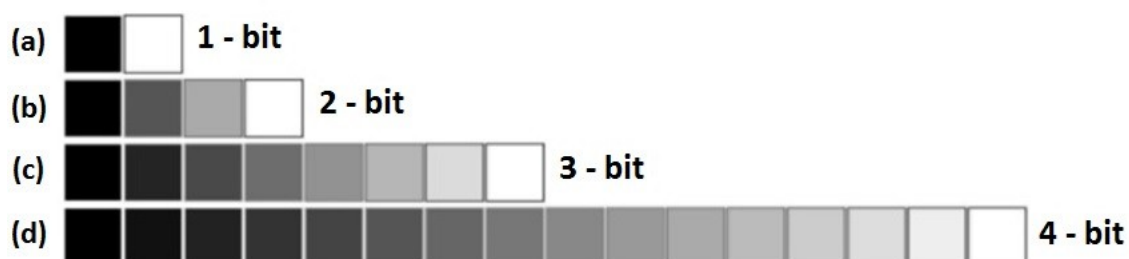
### 2.6.1.6 Transformação de uma imagem em cores para tons de cinza

Uma imagem em cores pode ser transformada para tonalidade de cinza. A cada cor é associada uma tonalidade, sendo que uma imagem colorida de 256 bits, ou seja, com 256 níveis de cores diferentes, pode ser convertida numa imagem com 256 tons de cinza. Na Figura 2.18 é mostrada a transformação de uma imagem colorida em tons de cinza.



**Figura 2.18:** Foto em cores transformada em tons de cinza(fonte: Gonzalez e Woods, 2009).

Já na Figura 2.19 são mostradas as tonalidades de cinza para diferentes números de bits que uma imagem pode ter.



**Figura 2.19:** Tons de cinza em função do número de bits de uma imagem (a)1-bit (b) 2-bit (c) 3bit e (d) 4 bit.

Nos dois extremos da distribuição de tonalidades de cinza no histograma estão a cor branca e preta, referenciadas pelos bits 0 e 255, respectivamente.

### 2.6.1.7 Binarização de uma imagem

Imagens que possuem somente dois níveis de tonalidades, ou cores, podem ser chamadas de imagens binárias.

A Figura 2.20 mostra uma imagem binária. É possível observar que a figura só possui duas cores que a definem.

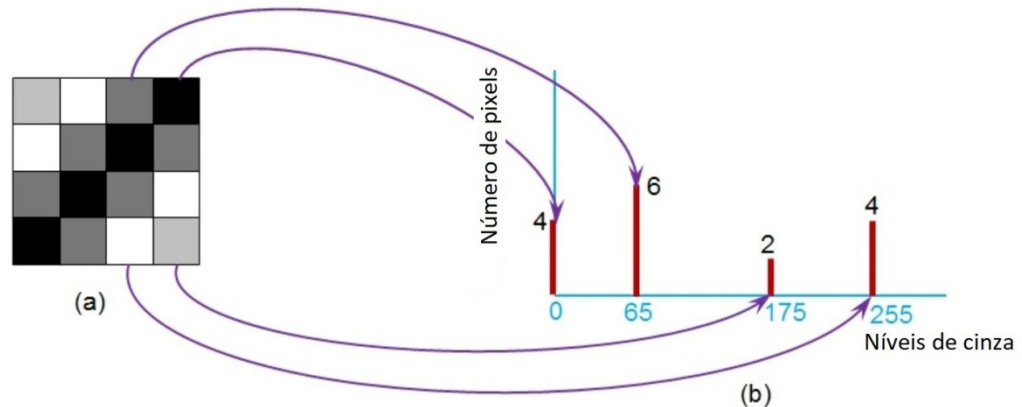


**Figura 2.20:** Imagem binária (fonte: Gonzalez e Woods, 2009).

Para transformar uma imagem colorida em uma imagem binária é preciso realizar uma sequência de ações de tratamento. Resumidamente, as etapas podem ser descritas por:

1. *Seleção da imagem de interesse:* a imagem que se deseja levar ao tom de preto e branco puros deve ser selecionada. Ela pode ser colorida ou em tons de cinza.
2. *Transformação para tons de cinza:* se a imagem for colorida, é possível transformá-la para os tons de cinza, onde cada tonalidade em cor é transformada em uma tonalidade específica de cinza variando entre preto puro e branco.
3. *Definição do Threshold:* o *threshold* é um limiar, ou seja, um limite de divisão na distribuição de frequência nas tonalidades de pixels que formam uma imagem.

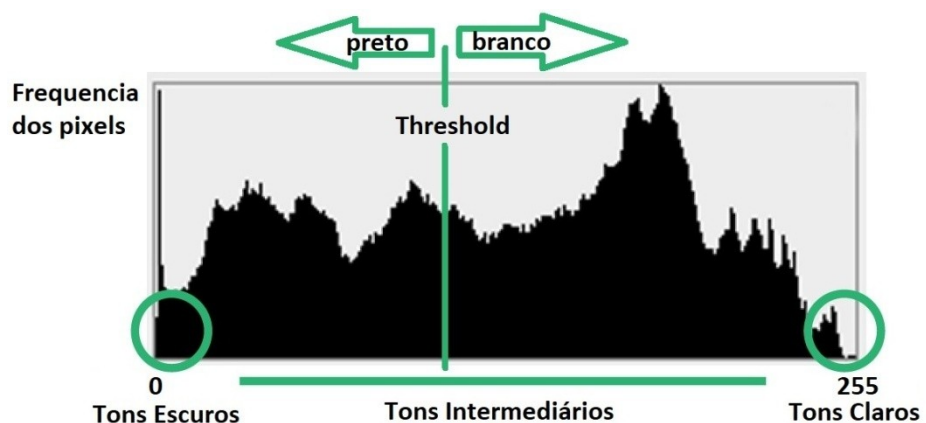
Para ilustrar o processo, é apresentada a Figura 2.20, onde há um histograma de frequência de pixels que formam uma imagem em relação com sua tonalidade.



**Figura 2.21:** Imagem em tons de cinza e seu histograma (fonte: allaboutcircuits.com, acesso em 04/12/2017).

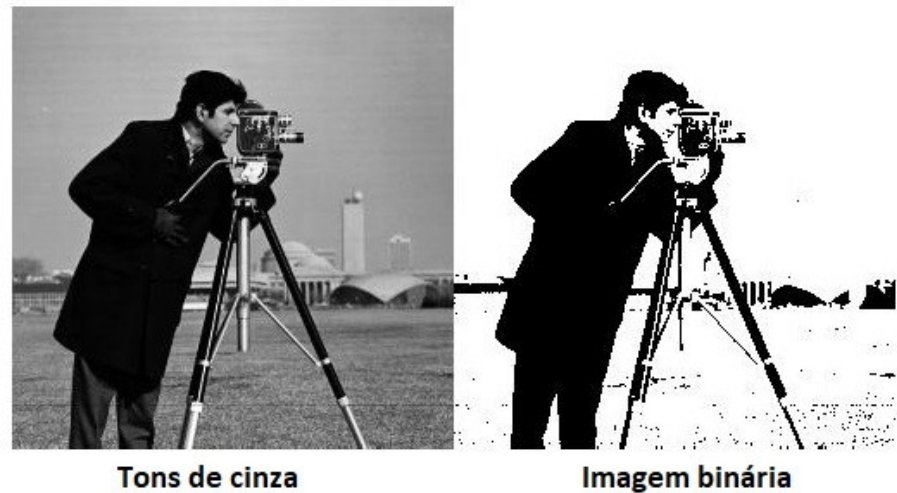
O valor do *threshold* para a binarização da imagem é escolhido a partir da distribuição de tonalidades de cinza no histograma da imagem (ABHIK, 2017).

Quando o *threshold* é aplicado, dividi-se essa distribuição de frequência dos pixels em uma ou mais regiões, onde os pixels correspondentes as tonalidades presentes em cada região passam a ter a mesma tonalidade, ilustrado na Figura 2.22:



**Figura 2.22:** Aplicação do *threshold* no histograma de uma imagem.

Quando os pixels de uma figura ficam definidos em somente duas possibilidades possíveis de tonalidades após a aplicação do *threshold*, diz que a imagem foi binarizada. A Figura 2.23 mostra uma imagem em tons de cinza sua equivalente binarizada



**Figura 2.23:** Binarização de uma imagem (fonte: Gonzalez e Woods, 2009).

Logicamente que a escolha da intensidade escolhida como o limite para o *threshold* tem impacto significativo na binarização de uma imagem.

Devido à presença de somente dois níveis de coloração, imagens binárias apresentam maior facilidade de processamento. Em alguns tipos de análise, imagens binárias podem ser utilizadas para operações onde se queira diferenciar somente dois níveis de interesse.

#### 2.6.1.8 Filtros de imagem

Como uma imagem digital pode ser associada a uma função  $f(x, y)$  onde cada pixel está associado a uma coordenada  $(x, y)$ , com um valor  $f$  de intensidade, é possível a realização de diversas operações, onde o objetivo é melhorar a qualidade da imagem (GONZALEZ e WOODS 2008).

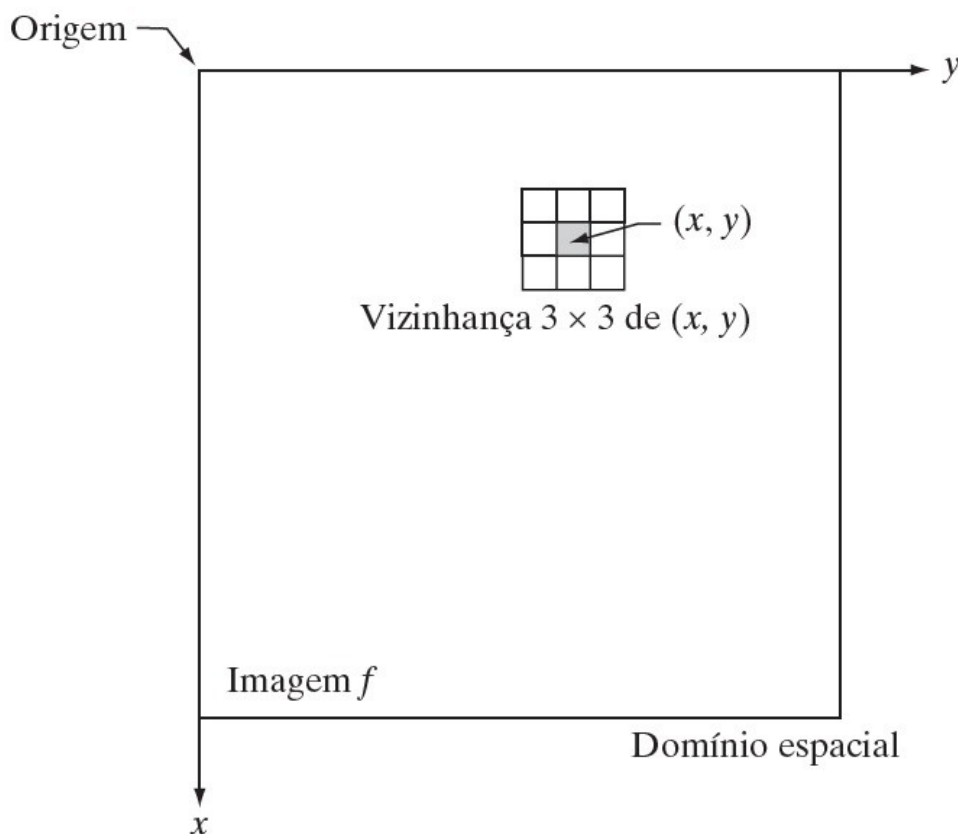
Estas operações são chamadas de filtros de imagem e são realizadas por algoritmos que fazem a “leitura” dos pixels presentes, editando seus valores de acordo com o efeito para o qual foram criados. Um processo na transformação de uma imagem a partir de um operador pode ser expresso pela Equação (2.33):

$$g(x, y) = T[f(x, y)] \quad (2.33)$$

sendo  $f(x, y)$  a imagem de entrada,  $g(x, y)$  a imagem de saída e  $T$  o operador

A aplicação destes filtros leva em consideração a tonalidade do pixel e daqueles que compõem sua vizinhança. A vizinhança de um pixel é definida pelos pixels adjacentes, nas

laterais à esquerda e direita, parte inferior e superior, além das diagonais. A Figura 2.24 mostra um pixel, na sua coordenada  $(x, y)$  e sua vizinhança.



**Figura 2.24:** Figura esquemática da vizinhança de um pixel (fonte: Gonzalez e Woods, 2009).

Em geral, a vizinhança é retangular e muito menor que a imagem.

O objetivo dos filtros é a correção de fatores relacionados à qualidade da imagem, que pode ser afetada por reflexos luminosos, diferentes fontes de luz, ou falta desta, no momento da aquisição da imagem (MATTA *et al*, 2015).

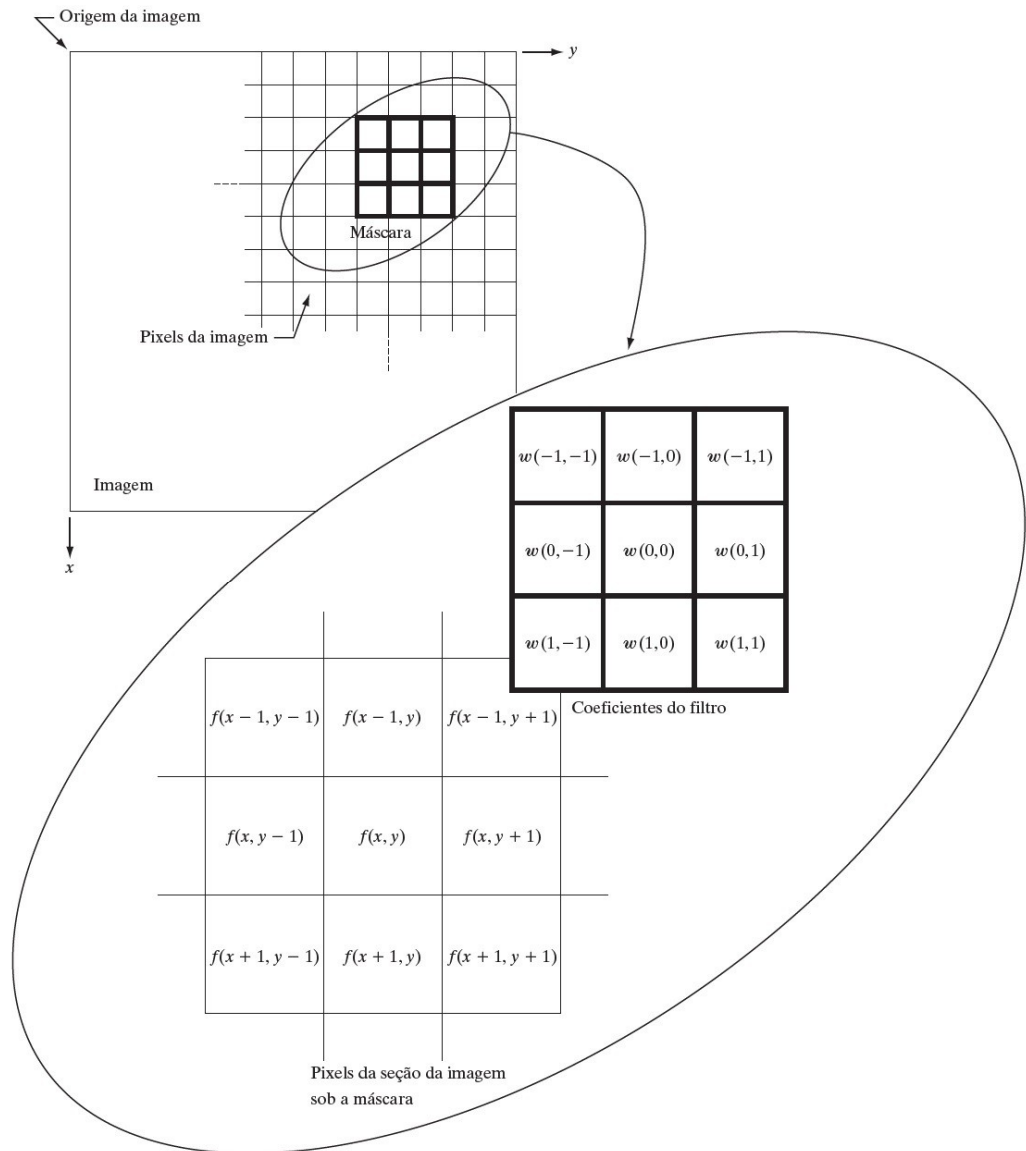
O termo filtro, no contexto da análise de imagem, se refere em aceitar (passar) ou rejeitar certos valores relacionados aos pixels (GONZALEZ e WOODS, 2009).

O filtro é aplicado à região de vizinhança do pixel. O tamanho desta região e sua forma definem a máscara do filtro. A Figura 2.25 mostra a máscara de um filtro.

Imagens onde se quer realçar determinadas características também são passíveis de aplicação de filtros.

O objetivo da aplicação dos filtros está relacionado à melhoria da nitidez, de efeitos de luminosidade e qualidade visual, além de casos específicos onde o alvo é a melhoria na qualidade e velocidade de processamento.





**Figura 2.25:** Máscara de um filtro (fonte: Gonzalez e Woods, 2008).

Há diversos tipos de filtros, cada um com seu algoritmo específico para a edição e tratamento da imagem. É possível a combinação de diferentes filtros para melhoria no tratamento da imagem.

## CAPÍTULO 3 - MATERIAL E MÉTODOS

Nesta Seção é apresentado o planejamento experimental executado, as variáveis de processo analisadas, os materiais utilizados e a unidade experimental. Também é descrito a operação da unidade.

As variáveis independentes analisadas nos experimentos deste trabalho foram: força-g, concentração volumétrica de sólidos, vazão de alimentação e inclinação da tela de peneiramento.

As variáveis resposta (dependentes) analisadas foram: teor de umidade dos sólidos retidos, o tamanho da região de piscina, a porcentagem de área ocupada na região de secagem pelos sólidos retidos e a velocidade de transporte dos sólidos retidos.

### 3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Os experimentos realizados foram executados seguindo um planejamento composto central (PCC). Foram dois experimentos no ponto central, com  $\alpha = 1,4826$ , totalizando 26 experimentos.

A codificação das variáveis independentes foi:

- Força-g imposta à peneira ( $X_1$ ): adimensional definido como a razão entre a aceleração vibracional e a aceleração gravitacional da terra, sendo dependente da frequência e amplitude de vibração da peneira.
- Concentração volumétrica de sólidos na suspensão ( $X_2$ ): é a porcentagem volumétrica de areia padronizada presente na suspensão que é alimentada na peneira.
- Vazão mássica de alimentação ( $X_3$ ): é a quantidade de suspensão em quilos por minuto que é alimentado na peneira.
- Inclinação da tela da peneira ( $X_4$ ): é o ângulo formado pela tela da peneira de maneira ascendente entre a alimentação e a área de coleta dos sólidos retidos pela tela.

O planejamento composto central foi escolhido devido ao menor número de experimentos a serem realizados quando comparado a um planejamento  $3^k$ . Além disso, o PCC também fornece os dados necessários para um ajuste de segunda ordem, que permite quantificar a não linearidade das variáveis em relação ao processo e a realização do ajuste de superfícies de resposta (MYERS *et al*, 2016).

O planejamento completo dos experimentos é mostrado na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1:** Matriz do PCC utilizado.

Experimento	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
1	-1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1	-1
3	-1	+1	-1	-1
4	+1	+1	-1	-1
5	-1	-1	+1	-1
6	+1	-1	+1	-1
7	-1	+1	+1	-1
8	+1	+1	+1	-1
9	-1	-1	-1	+1
10	+1	-1	-1	+1
11	-1	+1	-1	+1
12	+1	+1	-1	+1
13	-1	-1	+1	+1
14	+1	-1	+1	+1
15	-1	+1	+1	+1
16	+1	+1	+1	+1
17	0	0	0	0
18	0	0	0	0
19	$-\alpha$	0	0	0
20	$+\alpha$	0	0	0
21	0	$-\alpha$	0	0
22	0	$+\alpha$	0	0
23	0	0	$-\alpha$	0
24	0	0	$+\alpha$	0
25	0	0	0	$-\alpha$
26	0	0	0	$+\alpha$

Na Tabela 3.2 é mostrada a codificação das variáveis independentes do experimento.

**Tabela 3.2:** Variáveis e níveis para o PCC.

Nível	Força-g ( $X_1$ ) [adimensional]]	Conc. Vol. ( $X_2$ ) [%]	Vazão ( $X_3$ ). [kg/min]	Inclinação ( $X_4$ ). [°]
-1,4826	2,5	2,5	19	0
-1	3,0	3,0	25	0,5
0	4,0	4,0	37,5	1,5
+1	5,0	5,0	50	2,5
+1,4826	5,5	5,5	56	3,0

### 3.2 MATERIAL PARA O EXPERIMENTO

Para a realização dos experimentos, foram preparados 300 litros de suspensão sólido-líquido com areia padronizada. A densidade absoluta da areia foi de 2,6698 ( $\pm 0,0015$ ) kg/litro, medida através de método de picnometria por gás hélio no picnometro modelo *AccuPyc 1331* da *Micromeritics* e foi preparada com três porções mássicas iguais com padronizações: média grossa (#30), média fina (#50) e fina (#100).

A mistura final continha uma granulometria variando entre 90 e 1400 $\mu$ m, medida em peneiramento vibratório com utilização de peneiras da série *mesh Tyler AS 300 control* da *Retsch*.

O diâmetro médio de Sauter da areia utilizada foi de 373 $\mu$ m, calculado de acordo com a Equação (3.1):

$$\bar{d}_{ps} = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{d_{pi}}} \quad (3.1)$$

sendo que  $\bar{d}_{ps}$  é o diâmetro médio de Sauter,  $x_i$  é a fração mássica do material retido na peneira e  $d_{pi}$  é o diâmetro médio da abertura de tela entre as peneiras nas quais as partículas ficaram retidas.

A porção líquida da suspensão foi preparada com água e goma xantana, esta a 0,1% de concentração mássica. O processo de peneiramento vibratório não foi avaliado para valores maiores de concentração mássica de goma xantana devido a restrições operacionais da unidade experimental, o que inviabiliza a utilização de suspensões mais viscosas.

O cálculo da massa de areia necessária para a realização dos experimentos para os diferentes níveis foi realizado utilizando a Equação (3.2):

$$m_{areia} = 100 \rho_{areia} C_v V_{susp} \quad (3.2)$$

sendo  $m_{areia}$  a massa de areia em kg para o nível do experimento,  $\rho_{areia}$  a densidade da areia utilizada em kg/Litro,  $C_v$  a concentração volumétrica desejada e  $V_{susp}$  o volume da suspensão a ser preparada em Litros.

### 3.3 UNIDADE EXPERIMENTAL

A unidade experimental utilizada foi a mesma utilizada nos trabalhos de Guerreiro (2015) e Freitas (2017), e passou por mudanças no sistema de homogeneização da suspensão, controle de força-g e instalação da tela. Guerreiro (2015) utilizou um sistema de alimentação por gravidade, que posteriormente foi substituído por outro, com uma bomba de alimentação/recirculação, que garantiu uma alimentação com concentração volumétrica de sólidos constante no decorrer dos experimentos.

Além disso, foi instalado um sistema que permitia o controle manual da vazão de alimentação, regulada por um conjunto de válvulas juntamente com um sistema *by-pass* e a instalação de um medidor de taxa mássica tipo Coriolis na linha de alimentação da peneira.

Para o trabalho de Freitas (2017), também foi alterado o valor máximo de força-g permitido pelo sistema através do aumento do ganho proporcional no inversor de frequência. Sendo assim, valores maiores de força-g passaram a ser explorados experimentalmente.

Para os experimentos realizados neste trabalho, foram utilizados maiores valores de vazão de alimentação, além do início do estudo da variável inclinação da tela da peneira, regulada por um macaco mecânico.

Uma ilustração esquemática da unidade experimental utilizada é apresentada na Figura 3.1.

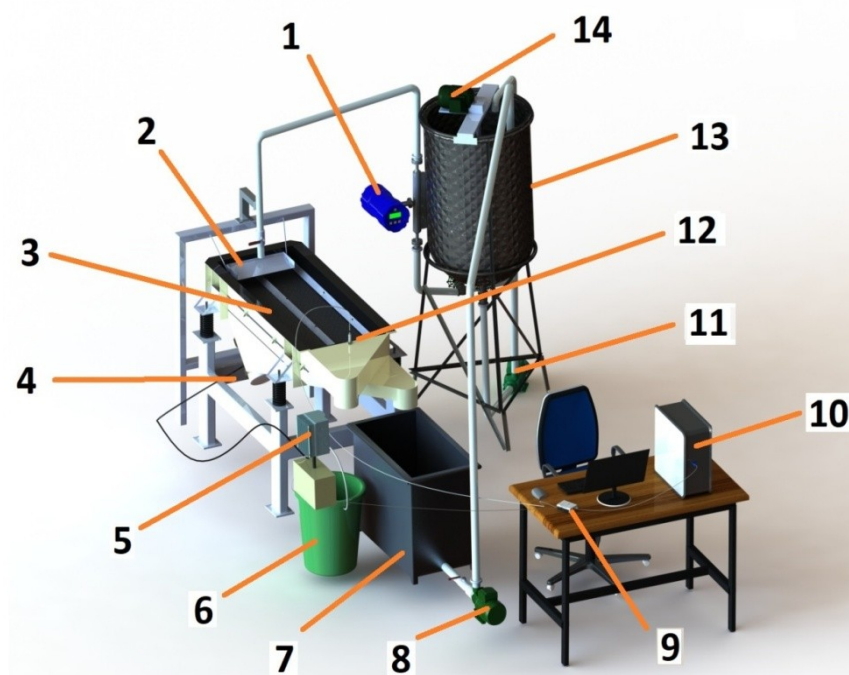


Figura 3.1: Ilustração esquemática da unidade experimental.

Componentes da bancada experimental:

1. Medidor de taxa mássica tipo Coriolis (CONTECH TCM028K);
2. Distribuidor de alimentação;
3. Peneira (Vibrokraft) com tela de 175 mesh (Tegape);
4. Motovibradores (VR4-07);
5. Inversor de frequência (WEG CFW700);
6. Recipiente de coleta de material retido;
7. Tanque de coleta de material passante;
8. Bomba de retorno do passante para o tanque de alimentação;
9. Placa de aquisição de dados (National Instruments USB 6008);
10. Computador (sistema de controle no software Labview®);
11. Bomba Recirculação/Alimentação;
12. Acelerômetro piezelétrico (PCB Piezoeletronic 646B00);
13. Tanque de alimentação – 300 litros;
14. Sistema de agitação mecânico;

### 3.3.1 Peneira vibratória

A peneira vibratória utilizada nos experimentos possui as seguintes características:

- Dimensões de 1,65 m de comprimento; 0,81 m de largura e 1,00 m de altura;
- Dois motovibradores de 0,75cv que impõem movimentação linear ao sistema de peneiramento;
- Quadro para montagem da tela de 1,0 m x 0,4 m de área de peneiramento.
- Tela de peneiramento de 175 mesh.

A peneira utilizada foi produzida pela fabricante Vibrokraft e possui dois motovibradores modelo VR4-07 de 0,75 cv de potência cada, mostrado na Figura 3.2, atuando de forma conjunta e em contra-rotação para gerar os movimentos vibratórios. O tipo de movimento do cesto é o linear de 45°. A tela utilizada foi adquirida junta à empresa Tegape e possui 175 *mesh*, correspondente a uma abertura de 95 $\mu$ m.



**Figura 3.2:** Motovibradores da peneira vibratória.

### 3.3.2 Sistema de alimentação da peneira

A mistura alimentada a ser separada foi armazenada no tanque de alimentação, que possui capacidade de 300 litros, e era direcionada através da tubulação proveniente do tanque de alimentação, sendo descarregada sobre a tela de peneiramento pelo distribuidor de alimentação, mostrado na Figura 3.3.



**Figura 3.3:** Distribuidor de alimentação da peneira vibratória.

A vazão de alimentação foi regulada por meio de uma válvula gaveta manual e era medida pelo medidor Coriolis modelo TCM028K, mostrado na Figura 3.4.



**Figura 3.4:** Medidor de taxa mássica tipo Coriolis.



Os sólidos retidos pela tela da peneira foram descarregados num recipiente plástico posicionado na saída de material retido, já o fluido que passava pela tela juntamente com o particulado mais fino foi para o tanque de coleta de passante, conforme Figura 3.5.



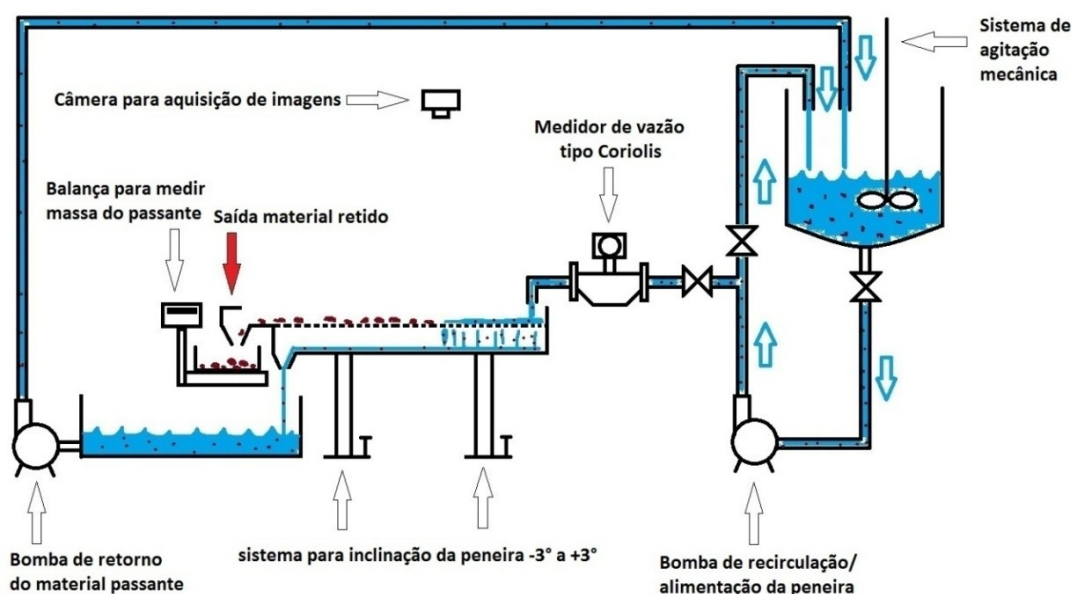
**Figura 3.5:** Saída material retido e passante da peneira (fonte Guerreiro, 2015, adaptado).

Duas bombas foram utilizadas no sistema, uma para retorno do material passante, acoplada no tanque de passante e que retornava o material para o tanque de alimentação, e outra no sistema de alimentação/recirculação da peneira. O sistema de alimentação/recirculação da peneira contava com uma bifurcação na tubulação logo após o recalque da bomba, com uma válvula em cada uma das tubulações originadas a partir da bifurcação. Uma das válvulas regulava a recirculação, responsável por manter a suspensão homogênea no tanque, já a outra regulava a vazão de alimentação, que era monitorada por leitura no medidor Coriolis. A Figura 3.6 mostra o sistema de alimentação/recirculação e a Figura 3.7 esquematiza como se dava a circulação da mistura na unidade experimental.





**Figura 3.6:** Sistema de alimentação/recirculação.

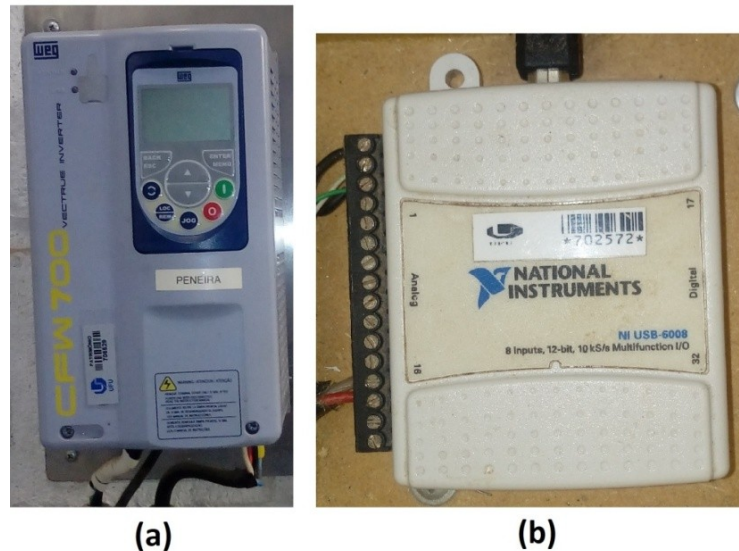


**Figura 3.7:** Circulação da mistura na unidade experimental.

### 3.3.3 Sistema de controle de força-g

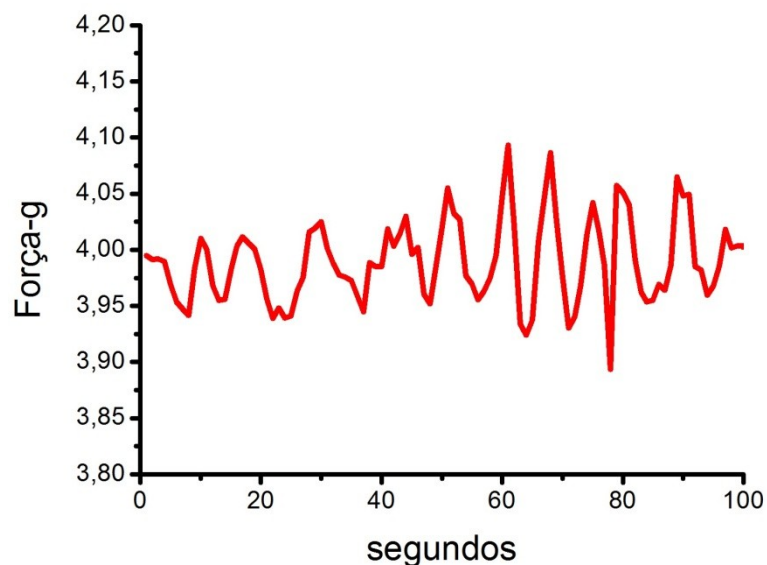
A variável força-g da peneira era imposta pela rotação dos motovibradores, e foi controlada por um sistema de controle proporcional implementado no *software Labview™*, que era processado por um computador presente na bancada ao lado, o sinal da força-g foi obtido através de um acelerômetro PCB646B00 e enviado ao computador. O sistema de

controle atuava na rotação dos motovibradores através do inversor de frequência WEG CFW700, mostrado na Figura 3.8(a), mantendo a variável força-g no *set point* desejado. A comunicação entre o inversor de frequência, o computador e o acelerômetro foi realizada por meio uma placa de aquisição de dados *National Instruments* USB 6008, mostrada na Figura 3.8(b).



**Figura 3.8:** (a)Inversor de frequência (b) Placa de aquisição de dados *National Instruments*.

Na figura 3.9 é mostrado um gráfico da força-g em função do tempo, em segundos, para um *set-point* de força-g igual a 4. Percebe-se que o sistema de controle foi capaz de manter o valor da força-g nas proximidades do *set-point* definido



**Figura 3.9:** Força-g versus tempo

### 3.3.4 Aquisição de imagem

Os experimentos foram gravados pela câmera de um celular modelo *LG XPower* com gravação de 30 frames por segundo e resolução *full HD* (1920x1080), fixado acima da peneira, de forma a filmar toda a tela, conforme Figura 3.10. Havia instalado sobre a tela de peneiramento um sistema de iluminação, para garantir uma boa qualidade da filmagem.



**Figura 3.10:** Sistema para fixação da câmera.

### 3.3.5 Inclinação da tela

A inclinação da tela de peneiramento era ajustada com o auxílio de um macaco mecânico, mostrado na Figura 3.11.



**Figura 3.11:** Macaco mecânico para ajuste da inclinação.

### 3.4 METODOLOGIA

#### 3.4.1 Preparação da suspensão sólido-líquido

Para a preparação da parte líquida da suspensão, a goma xantana foi dispersa em água numa proporção de 1g por litro de água. Devido à dificuldade para dissolver a goma xantana na água, foi utilizado um *mixer* Oster de 250 watt para auxiliar.

A goma xantana era dispersa aos poucos em água dentro de um balde plástico com o auxílio do *mixer* e transferida para o tanque de alimentação.

A parte líquida da suspensão foi preparada 24 horas antes dos experimentos, permanecendo sob agitação da bomba de recirculação/alimentação e agitador mecânico no tanque de alimentação por cerca de 3 horas após o preparo. O tempo de 24 horas é necessário para a completa hidratação da goma xantana.

Para evitar a proliferação de microorganismos, foi adicionado formol 37% em volume na suspensão, na proporção de 1ml por grama de goma xantana (Bicalho, 2015).

#### 3.4.2 Execução dos experimentos

Para a realização dos experimentos, todos os béqueres utilizados foram previamente numerados e pesados.

Cada um dos experimentos foi realizado de acordo com a seguinte sequência:

1. *Ajuste de inclinação da tela*: a inclinação da tela era ajustada com o auxílio do macaco mecânico para o valor desejado para o experimento a ser iniciado.
2. *Controle da força-g*: o sistema de controle era inicializado e o set-point de força-g do experimento definido através da interface do Labview™ no computador. Então esperava-se o sistema atingir o valor do set-point.
3. *Lubrificação da tela*: a tela de peneiramento era lubrificada com a suspensão, condição essencial para o peneiramento, já que a tela seca oferece maior resistência a passagem do líquido, afetando o desempenho do equipamento.
4. *Ajuste da alimentação*: a válvula de alimentação era aberta e a vazão ajustada com o auxílio do medidor de vazão para o valor desejado do experimento em execução.
5. *Aquisição de imagens*: a câmera do celular posicionado acima da peneira era ligada e seu foco ajustado para o início das gravações do experimento.

6. *Estado estacionário do sistema*: era aguardado o sistema entrar em estado estacionário, que devido às dimensões da peneira utilizada e a natureza do processo, era atingido rapidamente.
7. *Inicialização da contagem de tempo*: o cronômetro era iniciado para a marcação dos tempos de coleta.
8. *Coleta das amostras*: para cada experimento foram coletadas 3 amostras do material sólido retido pela tela, a cada 25 segundos.
9. *Fechamento da alimentação*: após a coleta das amostras, o experimento era finalizado com o fechamento da alimentação da peneira.
10. *Fim da aquisição de imagens para o experimento*: a câmera do celular era desligada e o vídeo gravado era identificado e transferido para o computador.
11. *Pesagem das amostras*: as amostras úmidas coletadas eram pesadas e suas massas anotadas.
12. *Secagem das amostras*: após serem pesadas, as amostras úmidas eram levadas à estufa por 24 horas na temperatura de 105°C.
13. *Retorno do líquido e sólido para o tanque de alimentação*: o líquido contido no tanque de passante era retornado para o tanque de alimentação no final do experimento através da bomba de retorno do líquido passante. Os sólidos na saída do material retido e no tanque do passante eram retornados manualmente, com o auxílio de baldes.
14. *Preparação do sistema para o próximo experimento*: o sistema era reajustado para as condições do experimento posterior.

Os experimentos foram executados da menor à maior concentração volumétrica de sólidos na alimentação, de modo que só se adicionasse sólidos à medida que os experimentos eram executados.

No início da gravação de cada experimento, era posicionado um papel com o número do experimento sendo executado para que a câmera gravasse. Isso foi feito para evitar qualquer transtorno futuro em relação à organização e tratamento de dados.

Os béqueres com material úmido permaneciam na estufa por 24 horas a 105°C, sendo pesados novamente no dia posterior, para o cálculo do teor de umidade dos sólidos retidos.

## CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

No Capítulo 4 são apresentados os resultados experimentais obtidos e a análise estatística. Para cada seção referente às variáveis dependentes analisadas, é feita a discussão dos resultados observados e a elaboração de explicações e teorias para os comportamentos experimentais observados.

### 4.1 RESULTADOS E ANÁLISE ESTATÍSTICA

Na Tabela 4.1 é apresentada a média dos resultados dos experimentos com as variáveis independentes em sua forma codificada. A tabela com todos os valores experimentais obtidos é apresentada no apêndice A.

**Tabela 4.1:** Resultados dos experimentos.

Exp	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$U(\%)$	$A_{Piscina}(cm^2)$	$v(cm/s)$	$A_{Sólidos}(\%)$
1	-1	-1	-1	-1	20,86	1852,86	2,34	59,18
2	+1	-1	-1	-1	21,9	1918,60	7,22	31,96
3	-1	+1	-1	-1	19,63	1251,44	9,5	26,34
4	+1	+1	-1	-1	22,17	1223	15	11,39
5	-1	-1	+1	-1	20,50	2731,09	5,02	46,25
6	+1	-1	+1	-1	22,43	2254,28	10,35	25,17
7	-1	+1	+1	-1	20,32	2140,73	6,94	47,98
8	+1	+1	+1	-1	20,60	1380,35	15,68	12,61
9	-1	-1	-1	+1	21,58	1088,85	3,37	35,16
10	+1	-1	-1	+1	22,86	1108,90	12,63	15,92
11	-1	+1	-1	+1	19,21	1009,6	10,62	28,11
12	+1	+1	-1	+1	19,50	906,69	17,00	13,3
13	-1	-1	+1	+1	20,36	1600,83	4,15	41,08
14	+1	-1	+1	+1	22,2	1503,57	11,95	13,65
15	-1	+1	+1	+1	19,33	1460,8	9,82	14,91
16	+1	+1	+1	+1	19,97	1236,70	16,86	9,61
17	0	0	0	0	21,26	1318,85	11,67	15,70
18	0	0	0	0	21,93	1285,76	11,75	15,04
19	$-\alpha$	0	0	0	20,68	1486,53	5,08	55,96
20	$+\alpha$	0	0	0	22,53	1165,49	14,02	11,59
21	0	$-\alpha$	0	0	21,47	1847,13	7,64	35,02
22	0	$+\alpha$	0	0	20,05	1211,73	13,57	12,34
23	0	0	$-\alpha$	0	22,65	1024,94	13,31	9,1
24	0	0	$+\alpha$	0	21,57	1572,40	11,83	14,27
25	0	0	0	$-\alpha$	21,76	1457,04	11,25	23,00
26	0	0	0	$+\alpha$	20,22	1042,05	12,01	13,45

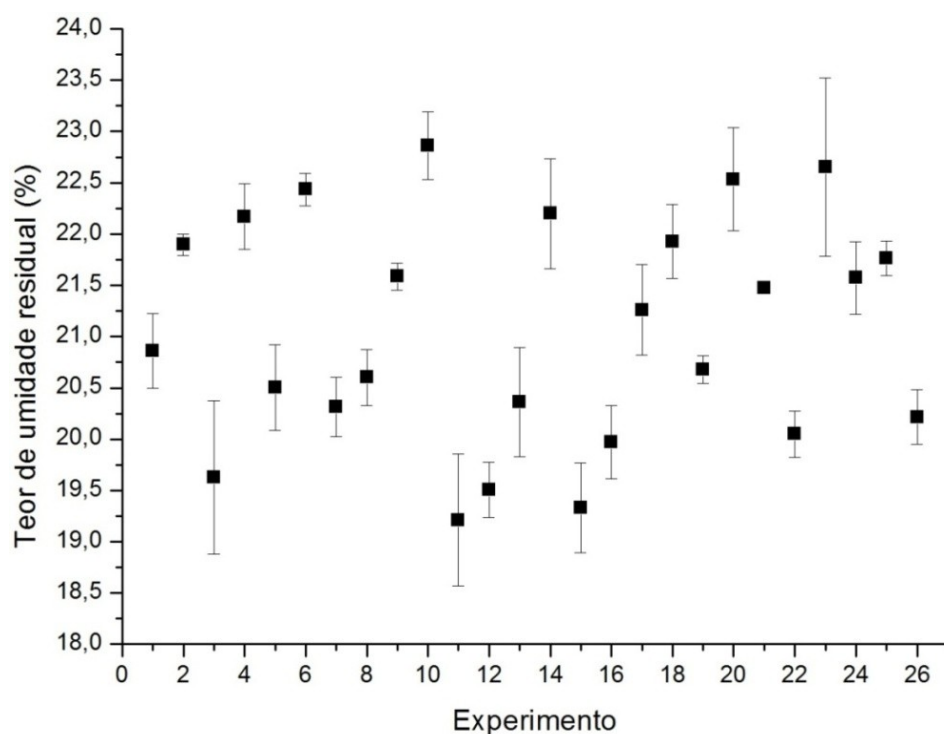
sendo  $U(\%)$  a umidade residual dos sólidos retidos,  $A_{piscina}(cm^2)$  a área de piscina,  $v(cm/s)$  a velocidade de transporte dos sólidos retidos na região de secagem e  $A_{Sólidos}(\%)$  a porcentagem de área de tela ocupada pelos sólidos retidos na região de secagem.

A análise estatística dos dados foi realizada no software STATISTICA 7 com o objetivo de avaliar quais variáveis são significativas ao processo. O nível de significância de todas as análises foi de 5%. Foram levados em conta os efeitos das variáveis principais e interação entre 2 variáveis.

Os modelos ajustados foram de segunda ordem, com seus parâmetros estimados pelo método dos mínimos quadrados. A descrição do tratamento estatístico dos dados está no Apêndice B. A análise dos resíduos está no Apêndice C.

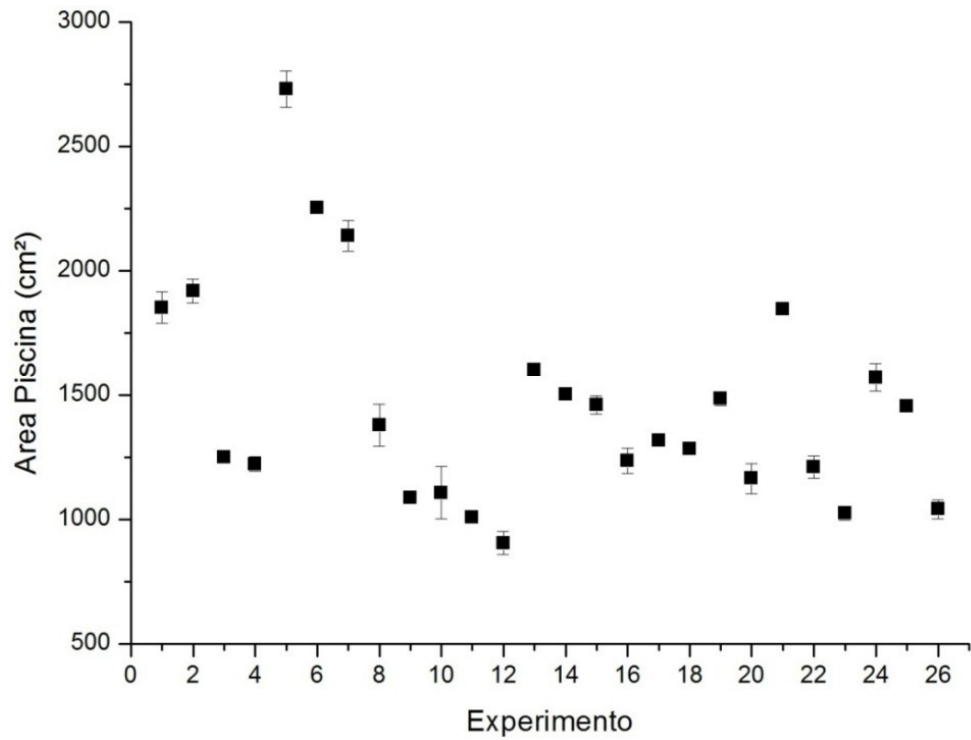
Também foram geradas superfícies de resposta relacionando as variáveis analisadas nos experimentos.

Os gráficos com os desvios padrões são mostrados nas Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, para as variáveis: teor de umidade residual dos sólidos retidos, área de tela ocupada pela região de piscina, velocidade de transporte dos sólidos retidos na região de secagem e porcentagem de área de tela ocupada por sólidos na região de secagem, respectivamente, em função do número do experimento.

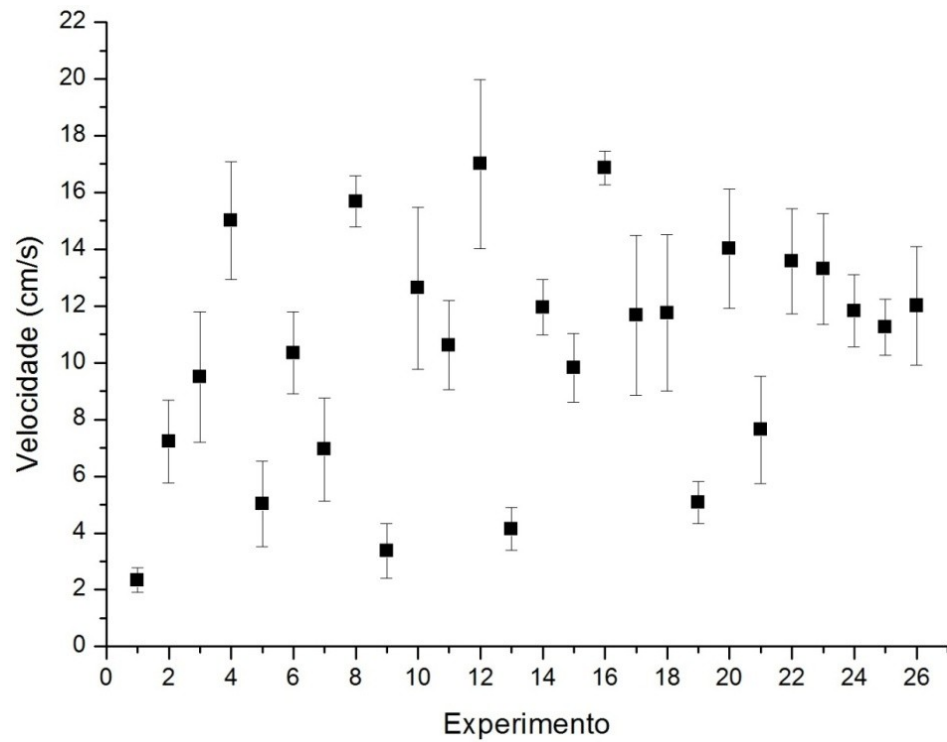


**Figura 4.1:** Resultados dos experimentos com os desvios padrão para o teor de umidade residual dos sólidos retidos pela peneira.



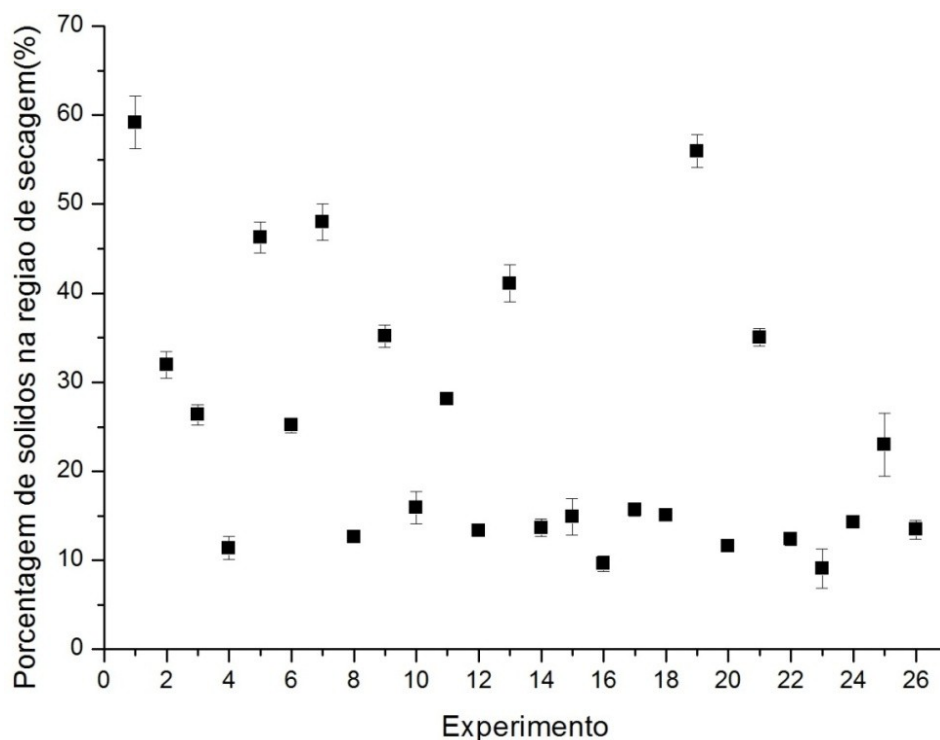


**Figura 4.2:** Resultados dos experimentos com os desvios padrão para a área de piscina.



**Figura 4.3:** Resultados dos experimentos com os desvios padrão para a velocidade de transporte dos sólidos na região de secagem.





**Figura 4.4:** Resultados dos experimentos com os desvios padrão para a porcentagem de sólidos na região de secagem.

Os resultados levando em conta todas as variáveis e efeitos de interação de 2 fatores, para um intervalo de confiança de 95%, após sucessivas eliminações dos valores maiores para os menores das variáveis com  $p > 0,05$ , levou aos modelos para o teor de umidade residual dos sólidos retidos, área de piscina, velocidade de transporte dos sólidos retidos na região de secagem e porcentagem de tela ocupada pelos sólidos na região de secagem. Os modelos gerados e suas superfícies de resposta, assim como a discussão dos resultados são mostrados nos tópicos a seguir.

## 4.2 ANÁLISE DE IMAGENS

Os vídeos foram analisados através da utilização do *software Free Video Editor* para a análise da velocidade de transporte. Já para a área de região de piscina os frames para as análises foram selecionados no *software Free Video Editor* e analisados no *software* de análise de imagens *imageJ*.

### 4.3 TEOR DE UMIDADE DOS SÓLIDOS RETIDOS

O teor de umidade dos sólidos retidos foi calculado com a Equação (2.1).

Para o teor de umidade, o modelo de segunda ordem ajustado é apresentado na Equação (4.1):

$$U(\%) = 21,7638 + 0,618 X_1 - 0,690 X_2 - 0,501 X_2^2 - 0,278 X_4 - 0,396 X_4^2 - 0,3755 X_2 X_4 \quad (4.1)$$

O teor de umidade está relacionado com as variáveis força-g ( $X_1$ ), concentração volumétrica de sólidos ( $X_2$ ) e inclinação ( $X_4$ ). O coeficiente de correlação múltipla foi de  $R^2 = 0,8256$ , podendo ser considerado satisfatório neste caso devido à dificuldade em relação à coleta das amostras, visto que os sólidos retidos saem pelo bocal de descarga em “blocos”, devido à natureza do processo de peneiramento vibratório, que forma conglomerados de sólidos úmidos com tamanhos variados, o que também pode influir no teor de umidade residual.

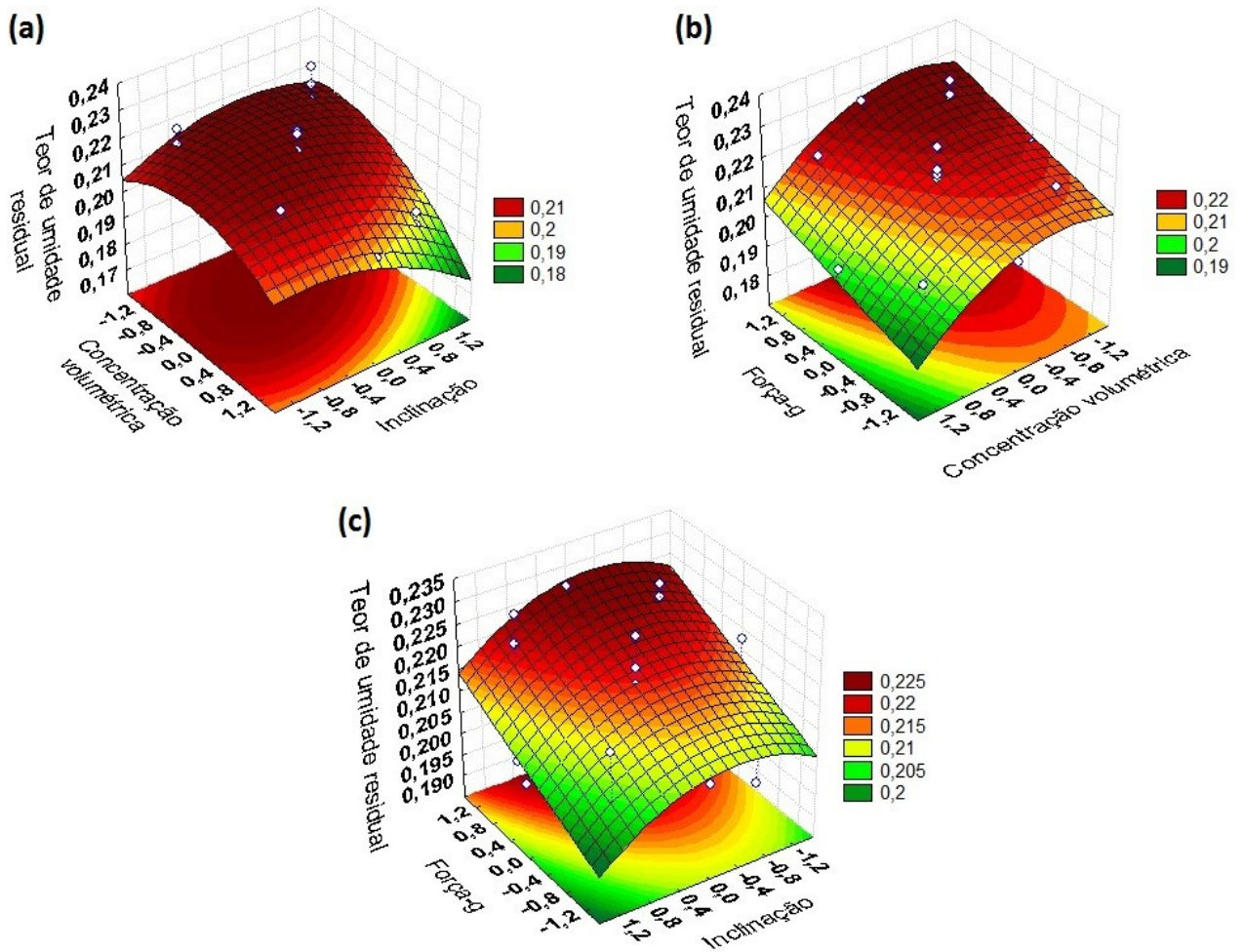
Isto explica os grandes valores observados nos desvios padrão do teor de umidade dos sólidos retidos apresentados na Figura 4.1.

As superfícies de resposta do teor de umidade residual dos sólidos retidos em relação a suas variáveis dependentes são mostradas na Figura 4.5

Pelas superfícies de resposta e equação do modelo ajustado, é possível observar que o teor de umidade dos sólidos retidos aumenta à medida que a força-g aumenta. Uma hipótese para este motivo é que o aumento da força-g faz com que a velocidade de transporte dos sólidos retidos aumente, diminuindo o tempo destes na região de secagem, fazendo com que saiam mais úmidos.

Já o aumento na concentração volumétrica de sólidos contribui para a diminuição do teor de umidade residual dos sólidos retidos pela tela de peneiramento.

Pelo fato destes conglomerados serem mais pesados, ficam mais tempo em contato com a tela, ao passo que conglomerados menores possuem uma trajetória mais instável, quicando sobre a tela, diminuindo o tempo de contato com esta.



**Figura 4.5:** Superfícies de resposta para o teor de umidade (a) em função da concentração volumétrica e inclinação (b) em função da força-g e concentração volumétrica e (c) em função da força-g e inclinação.

Uma justificativa para isso é que o aumento da concentração volumétrica de sólidos faz com que haja mais sólidos sobre a tela, formando conglomerados maiores, o que pode estar contribuindo para um melhor deságüe.

Para a inclinação, o ponto de maior teor de umidade residual é para o valor de inclinação correspondente a  $1,5^\circ$  ( $X_4 = 0$ ), e o menor valor é para a inclinação mais alta de  $3^\circ$  ( $X_4 = +1,4826$ ), o que justifica a utilização da peneira de forma ascendente. A justificativa para que isto ocorra é que com uma inclinação maior o tamanho da região de piscina diminui, aumentando, assim, a região de secagem, o que contribui para uma melhor secagem dos sólidos devido a um aumento no tempo de residência na área de secagem dos sólidos retidos.

#### 4.4 ÁREA DE PISCINA

A área ocupada pela região de piscina foi avaliada através do *software imageJ*, para cada um dos experimentos, conforme o planejamento composto central proposto. Para cada corrida foram analisadas três imagens da peneira em funcionamento, sendo estas imagens coletadas a partir de frames da gravação do processo, retirados do vídeo através do *software Free Video Editor*, sendo posteriormente realizada a média entre elas e calculado o desvio padrão, sendo esta área média utilizada como variável resposta. A Figura 4.6 demonstra o processo de seleção da área inundada pelo líquido através do *software imageJ*:



**Figura 4.6:** Demarcação da área de inundação medida através de análise de imagem.

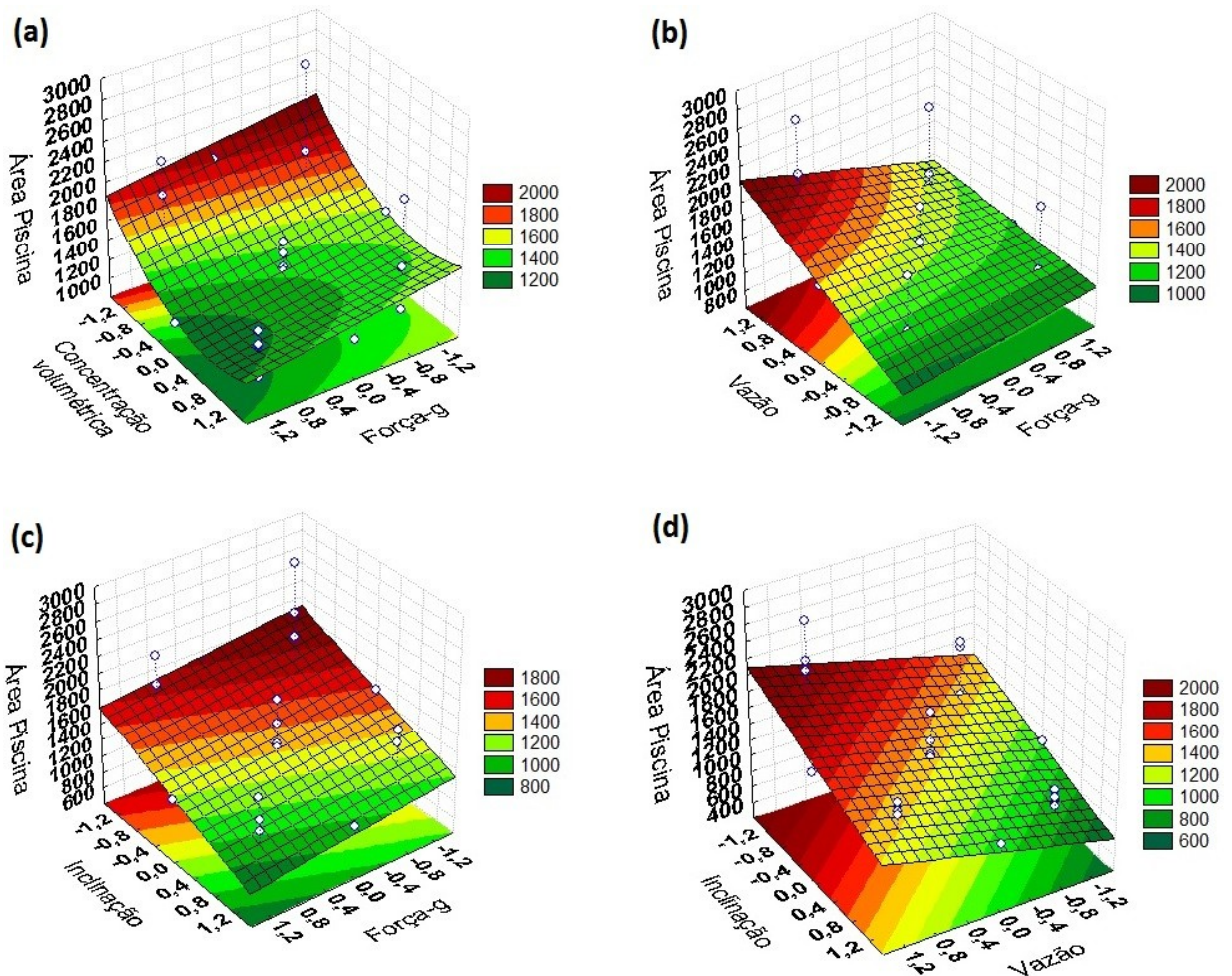
A existência de uma marcação de 20 cm de comprimento na lateral da peneira permitiu o cálculo preciso da área de tela ocupada pela suspensão, já que o *software imageJ* permitiu a definição de uma escala condizente com a realidade da imagem analisada.

O modelo de segunda ordem ajustado para a área ocupada pela região de piscina é apresentado pela Equação (4.2):

$$A_{Piscina}(cm^2) = 1341,309 - 101,935 X_1 - 215,272 X_2 + 233,333 X_3 - 267,339 X_4 + 157,246 X_2^2 - 94,624 X_1 X_3 + 129,496 X_2 X_4 \quad (4.2)$$

A área ocupada pela região de piscina está relacionada às variáveis força-g ( $X_1$ ), concentração volumétrica de sólidos ( $X_2$ ), vazão de alimentação ( $X_3$ ) e inclinação ( $X_4$ ). O coeficiente de correlação  $R^2 = 0,9218$  foi satisfatório.

As superfícies de resposta da área de piscina em função de suas variáveis dependentes são mostradas na Figura 4.7.



**Figura 4.7:** Superfícies de resposta para a área de piscina: (a) em função da força-g e concentração volumétrica (b) em função da força-g e vazão de alimentação (c) em função da inclinação e força-g e (d) em função da vazão e inclinação.

Pela análise das superfícies de resposta e da equação ajustada do modelo, é possível verificar que o aumento da força-g contribui para uma diminuição do tamanho da região de



piscina na peneira, mantendo o líquido mais longe da saída do material retido, fato também observado por Dorry (2010), pois o aumento na intensidade de vibração da peneira promove um maior fluxo de passagem de líquido através da tela (ASME, 2005).

Já para a concentração volumétrica, quando esta aumenta, é possível observar uma diminuição na região de piscina. A princípio parece um fato contraditório, mas uma observação mais detalhada durante a realização dos experimentos permitiu constatar que uma maior quantidade de sólidos provocava o represamento da região de piscina, diminuindo seu avanço pela tela, porém aumentando a altura da piscina devido à barreira formada pelos sólidos retidos no final desta.

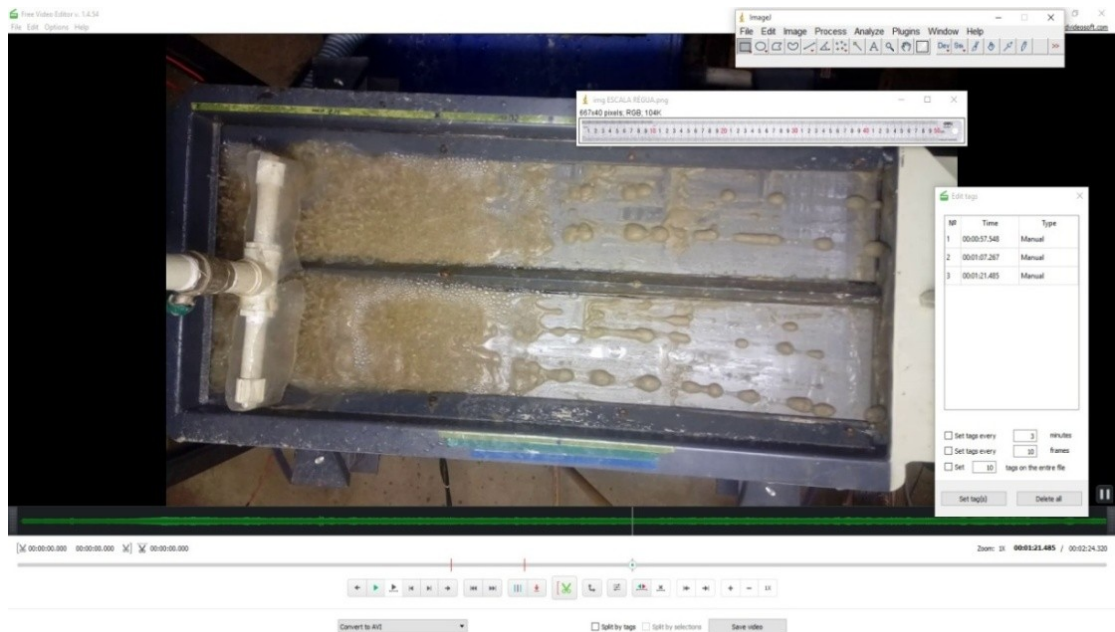
A vazão contribui para o aumento da região de piscina, visto que há uma maior taxa de mistura sendo alimentada, promovendo maior avanço da região de piscina sobre a tela da peneira.

Já o aumento da inclinação promove a diminuição da região de piscina, mas aumenta a altura desta.

#### **4.5 VELOCIDADE DE TRANSPORTE DOS SÓLIDOS RETIDOS**

Os vídeos com a gravação dos experimentos foram executados através do *software Free Video Editor*, que permite a passagem frame por frame da filmagem realizada, sendo as distâncias percorridas medidas por uma imagem de régua digital aberta simultaneamente em tela pelo *software imageJ*. Assim foi possível medir a distância percorrida pelo sólido e o tempo gasto por este para percorrer esta distância, em termos do comprimento da régua digital. A Figura 4.8 ilustra o processo.

Uma marcação de 20 cm feita na borda da peneira, e captada pela gravação, foi utilizada como escala real do deslocamento dos sólidos, permitindo a conversão da distância percorrida na escala da régua digital para o comprimento real do deslocamento. Dividindo-se pelo tempo analisado no vídeo, tinha-se o valor da velocidade real do sólido sobre a tela de peneiramento.



**Figura 4.8:** Análise do vídeo utilizado para avaliação da velocidade de transporte dos sólidos retidos.

O cálculo da velocidade real do deslocamento, calculado a partir das medidas descritas é mostrado pela Equação (4.3):

$$v_R = C \left( \frac{\Delta d_{digital}}{t_{segundos\ inteiros} + \frac{n_{frames}}{30}} \right) \quad (4.3)$$

sendo que  $\Delta d_{digital}$  é a distância na imagem digital percorrida pelo conglomerado e medida com unidades da régua digital,  $t_{segundos\ inteiros}$  são os segundos inteiros para que o conglomerado percorresse a distância medida,  $n_{frames}$  é a quantidade de frames além dos segundos inteiros, os frames são a menor fração do tempo analisado neste trabalho, sendo um total de 30 frames por segundo de vídeo, já  $C$  é o fator de conversão do comprimento medido pela régua digital para o real, calculado pela Equação (4.4):

$$C = \frac{l_{medida\ real}}{L_{régua\ digital}} \quad (4.4)$$

A velocidade foi medida a partir do movimento dos conglomerados sólidos que se formam na região de secagem da peneira vibratória e se deslocam em direção da saída dos sólidos retidos pela tela.

A análise da velocidade de transporte foi realizada seis vezes para cada experimento, sendo feita uma média entre estas e o cálculo do desvio padrão, sendo a média da velocidade de transporte utilizada como variável resposta do processo.

O modelo de segunda ordem ajustado para a velocidade de transporte é mostrado pela Equação (4.5):

$$v(cm/s) = 11,95073 + 3,34238 X_1 + 2,60782 X_2 + 0,75814 X_4 - 1,22375 X_1^2 - 0,74404 X_2^2 - 0,54525 X_2 X_3 \quad (4.5)$$

A velocidade de transporte dos sólidos retidos na região de secagem está relacionada com as variáveis força-g ( $X_1$ ), concentração volumétrica de sólidos ( $X_2$ ), inclinação ( $X_4$ ) e vazão ( $X_3$ ). O coeficiente de correlação múltipla foi de  $R^2 = 0,9511$ , considerado bom. A interação entre força-g e vazão ( $X_2 X_3$ ) teve  $p=0,050409$ , valor muito próximo do limite aceito e por isso foi inserida no modelo

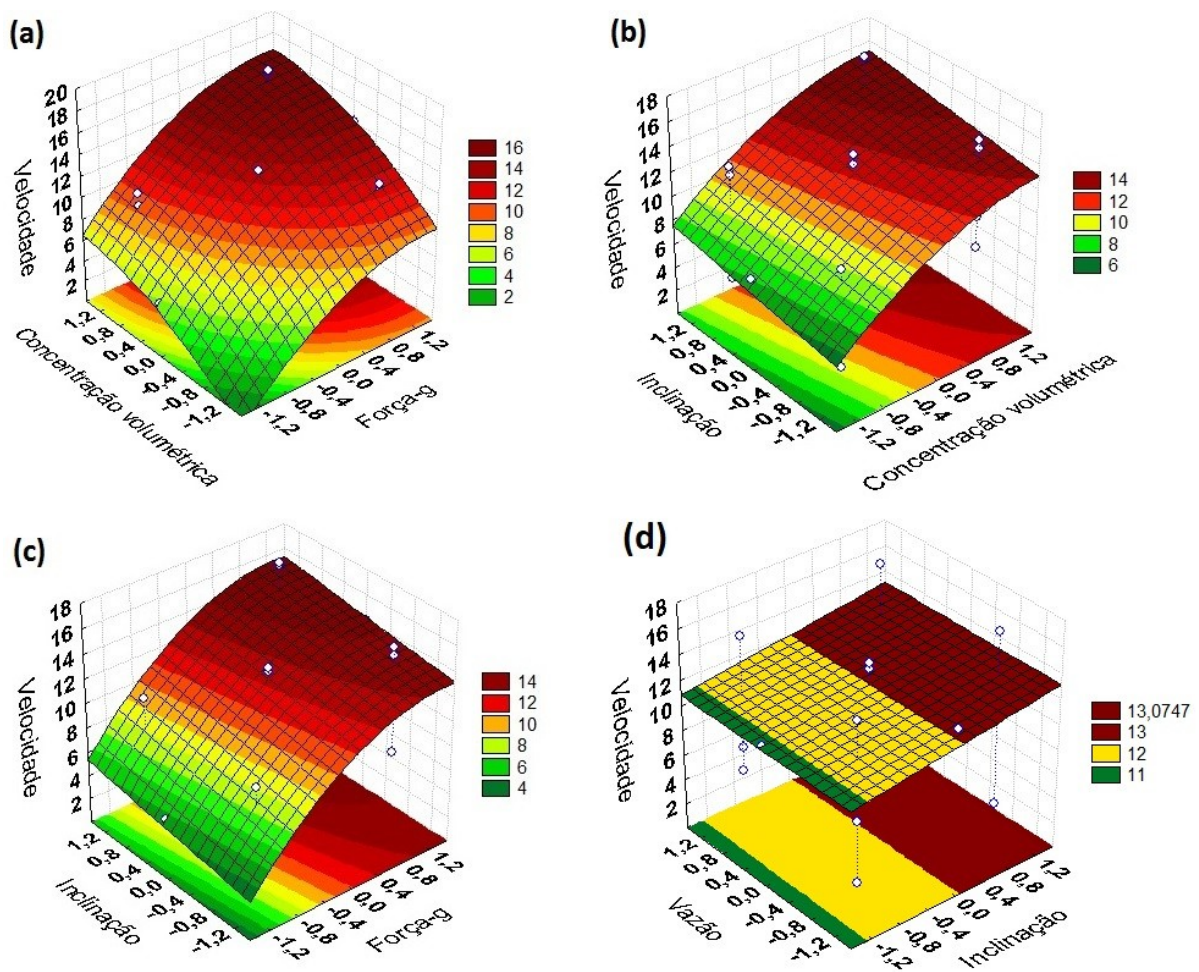
As superfícies de resposta da velocidade de transporte dos sólidos retidos em função de suas variáveis dependentes são mostradas na Figura 4.9.

Pelas superfícies de resposta e o modelo ajustado, é possível observar que o aumento na força-g promove um aumento na velocidade de transporte dos sólidos retidos pela peneira, o que é justificado pelo aumento da frequência de vibração dos motovibradores, que está diretamente relacionado à velocidade de transporte (YIN *et al*, 2016, DORRY, 2010).

Já para a concentração volumétrica de sólidos, é possível observar que o aumento desta promove um aumento na velocidade de transporte dos sólidos retidos. Uma hipótese para explicar este fato pode ser que em maiores concentrações volumétricas de sólidos, há a formação de conglomerados maiores, que possuem maior massa, o que acarreta em mais tempo de contato com a tela sobre influência da frequência de vibração dos motovibradores, pois sua maior massa evita seu descolamento da tela devido ao lançamento causado pela amplitude do movimento. Outra possível explicação é que com mais sólidos sobre a tela, a massa do sistema aumenta e para manter a força-g no valor do *set-point* o sistema de controle aumenta a frequência de vibração dos motovibradores, aumentando a velocidade de transporte.



Para o aumento na inclinação, houve um aumento da velocidade de transporte dos sólidos retidos. O trabalho de modelagem pelo método de elementos discretos de Yin *et al*, (2016) mostra que a combinação de vários fatores pode contribuir para uma maior velocidade de transporte. Variáveis como o ângulo de vibração gerado pela rotação dos motovibradores podem variar à medida que a inclinação do cesto muda, o que altera a dinâmica de transporte sobre a tela e outras variáveis como o ângulo de lançamento dos sólidos retidos (YIN *et al*, 2016). Uma quantificação do real motivo para o resultado observado neste caso carece de mais estudos.

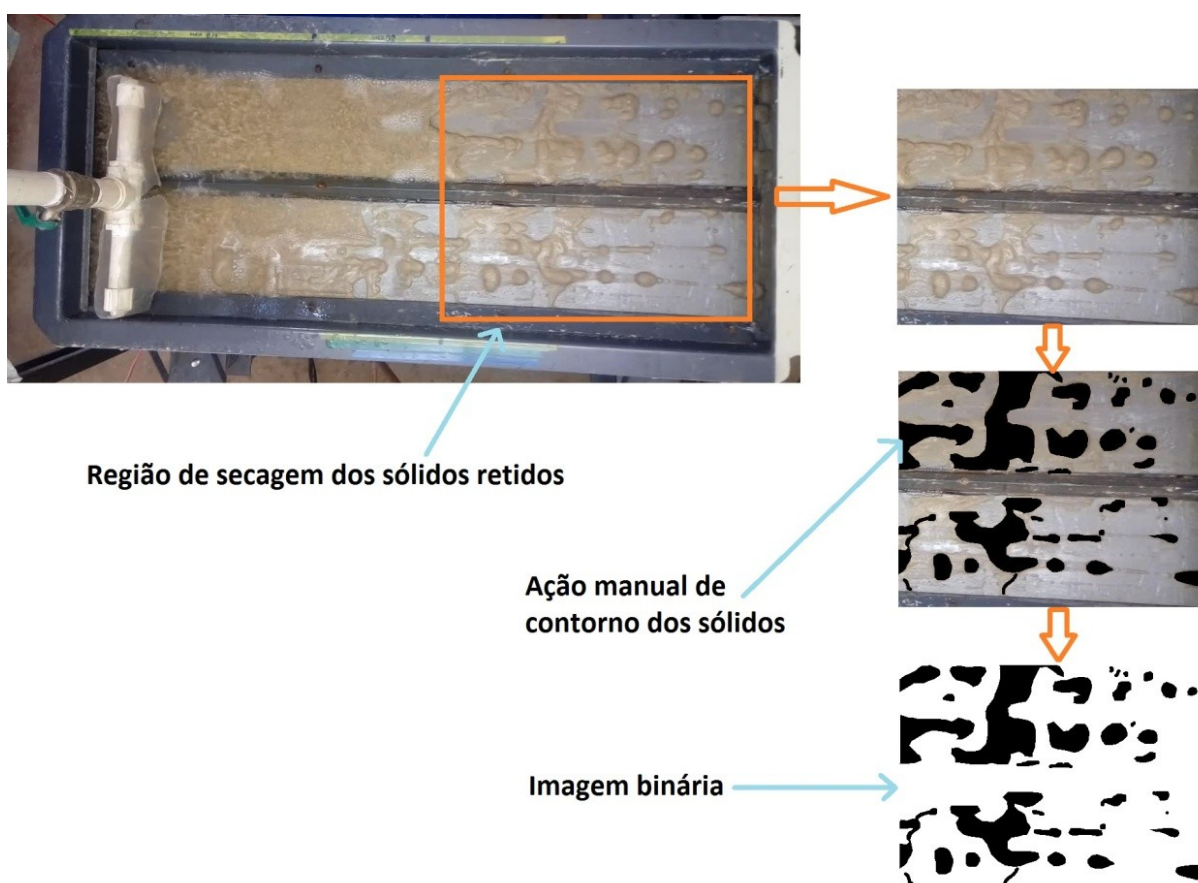


**Figura 4.9:** Superfícies de resposta para a velocidade de transporte dos sólidos retidos na região de secagem (a) em função da força-g e concentração volumétrica de sólidos (b) em função da inclinação e concentração volumétrica de sólidos, (c) em função da inclinação e força-g e (d) em função da vazão e inclinação.

#### 4.6 ÁREA DE TELA OCUPADA PELOS SÓLIDOS NA REGIÃO DE SECAGEM

Os frames para as análises foram selecionados no *software Free Video Editor* e analisados pelo *software* de análise de imagens *ImageJ*. As imagens passaram por ação manual de tratamento, já que a tonalidade do material sólido e da tela de peneiramento não estava sendo distinguida pelos filtros do *software*. O *threshold* também foi definido manualmente para a identificação adequada dos sólidos retidos, e os frames binarizados para contabilizar a porcentagem de área ocupada pelo sólido úmido retido na região de secagem.

A Figura 4.10 demonstra o processo realizado, assim como a região de interesse para análise



**Figura 4.10:** Binarização da região ocupada pelos sólidos na região de secagem.

Foi medida a porcentagem de área ocupada pelos sólidos retidos em três momentos de cada vídeo, e calculada a média e o desvio padrão entre elas.

Para a porcentagem de área de tela ocupada pelos sólidos retidos na região de secagem da peneira vibratória, foi ajustado o modelo de segunda ordem mostrado na Equação (4.6):

$$A_{Sólidos}(\%) = 18,0035 - 11,3344 X_1 - 6,7534 X_2 - 5,0643 X_4 + 8,3362 X_1^2 \quad (4.6)$$

A área de tela ocupada pelos sólidos retidos depende das variáveis independentes força-g ( $X_1$ ), concentração volumétrica de sólidos ( $X_2$ ) e inclinação ( $X_4$ ). O coeficiente de correlação múltipla foi de  $R^2 = 0,80479$ , um valor considerado baixo, mas justificável devido ao fato de haver outras variáveis relacionadas ao comportamento do material particulado úmido que não foram contabilizadas devido à dificuldade de quantificação destes fatores. Materiais particulados apresentam características comportamentais diferentes quando úmidos (JIANG, 2017, RONDET *et al*, 2017), sendo que estes fenômenos podem estar relacionados a forças de coesão, devido a umidade, que se alteram dependendo da intensidade da vibração, fração líquida e proximidade entre as partículas.

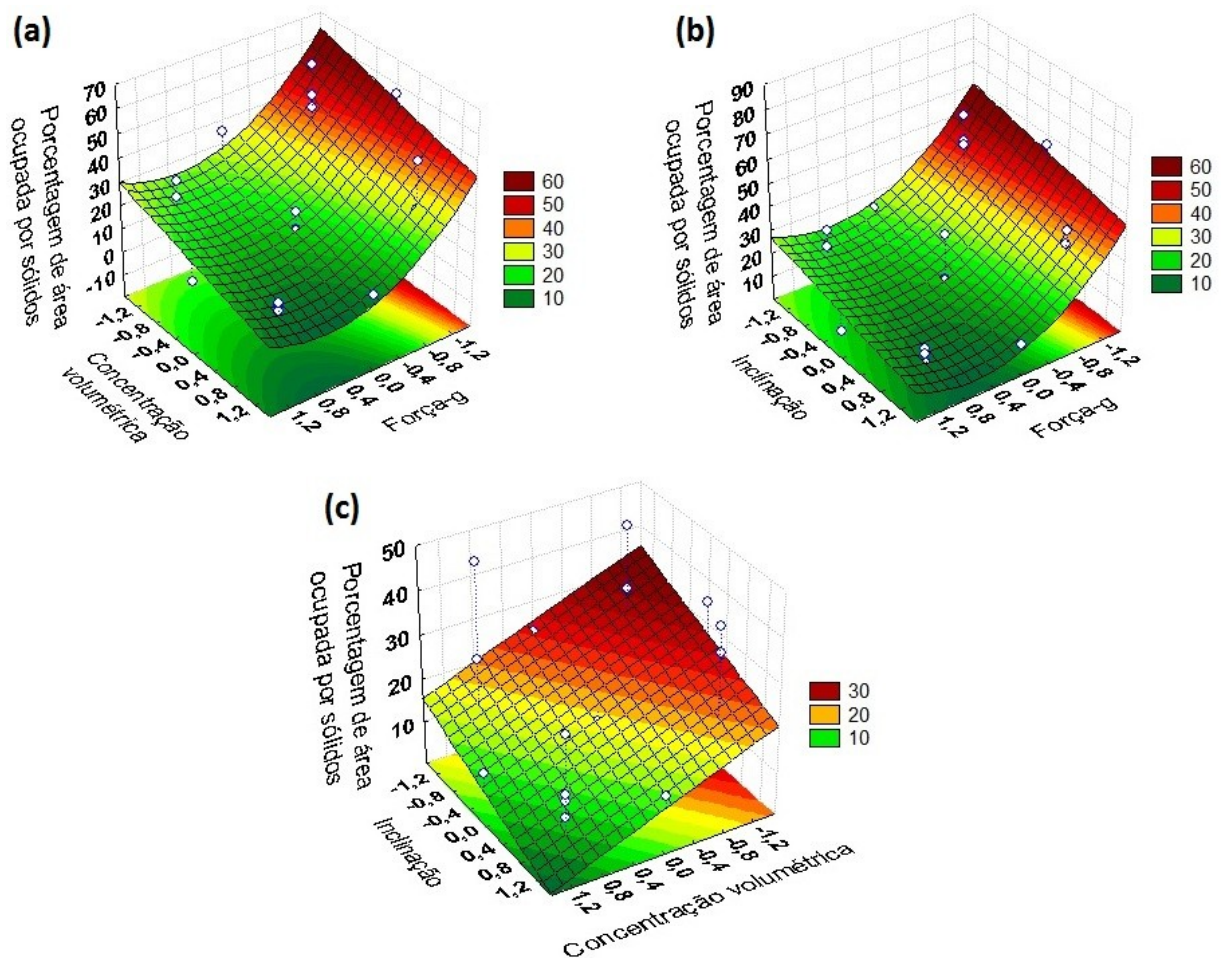
As superfícies de resposta para a porcentagem de área de tela ocupada pelos sólidos retidos na região de secagem são mostradas na Figura 4.11.

Analizando a superfície de resposta e o modelo de segunda ordem, é possível observar que quanto maior a força-g, menor é a área de tela ocupada pelos sólidos retidos. Isso acontece porque maiores valores de força-g fazem com que sejam formados conglomerados com maior massa, porém que ocupam menos espaço por serem mais altos e poucos dispersos, contribuindo para a diminuição do percentual de área de tela ocupada pelos sólidos. Além disso, o aumento da força-g aumenta a velocidade de transporte, fazendo com que o tempo de residência dos sólidos retidos na região de secagem diminua, acarretando numa menor ocupação desta área.

O efeito da concentração volumétrica de sólidos é de diminuição da porcentagem da área de tela ocupada pelos sólidos retidos na região de secagem. Uma hipótese é que uma maior quantidade de sólidos, devido a uma maior concentração volumétrica na alimentação, faz com que a distância entre as partículas diminua, facilitando a formação dos conglomerados devido às forças de coesão das partículas úmidas. Uma das observações realizadas durante os experimentos é que conglomerados mais altos ocupam menor área, pois ficam menos dispersos sobre a tela. Além disso, como já mencionado anteriormente, o aumento da concentração volumétrica está relacionado ao aumento da velocidade de

transporte dos sólidos retidos na região de secagem, o que também contribui para uma menor porcentagem de área de tela ocupada pelos sólidos retidos.

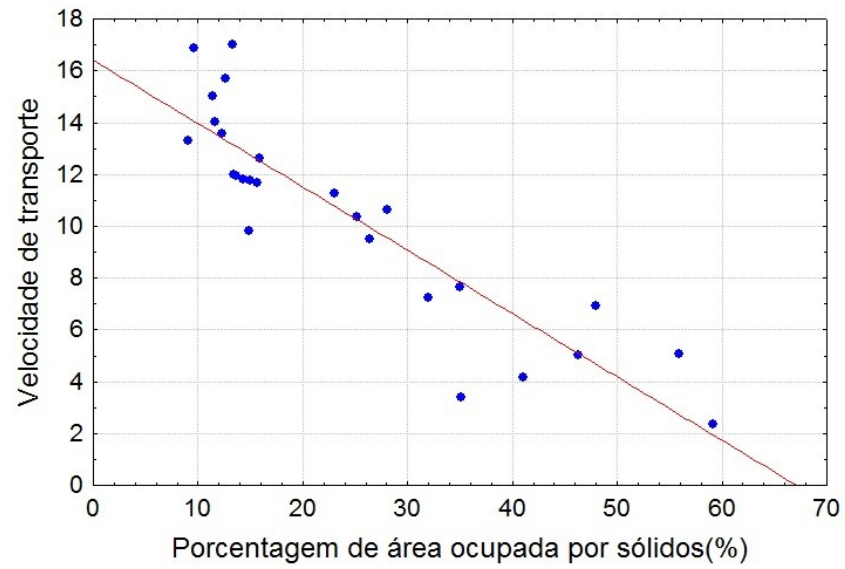
Já para o aumento da inclinação, há uma diminuição da área de tela ocupada pelos sólidos retidos, fato que também pode estar relacionado com o aumento da velocidade de transporte, que aumentou com a inclinação para as faixas de estudo das variáveis analisadas neste trabalho.



**Figura 4.11:** Superfícies de resposta para a área de tela ocupada pelos sólidos na região de secagem (a) em função concentração volumétrica e força-g (b) inclinação e força-g e (c) inclinação e concentração volumétrica.

A relação entre a velocidade de transporte e a área ocupada pelos sólidos retidos é mostrada na Figura 4.12. É possível perceber que há uma forte relação entre as variáveis.





**Figura 4.12:** Relação entre velocidade de transporte dos sólidos retidos e área de tela ocupada pelos sólidos na região de secagem.

sendo assim, observa-se que a velocidade de transporte atua de forma significativa na diminuição da porcentagem de sólidos na região de secagem.

## **CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

A partir dos resultados obtidos, foi possível analisar a dinâmica relacionada ao comportamento da peneira vibratória. Ficou clara a eficiência de técnicas de análise de imagens aplicada a este caso, que possibilitou uma forma de medir determinadas variáveis de maneira quantitativa, facilitando muito a análise estatística dos dados.

O maior valor de umidade residual foi observado para o experimento 10, com valor de 22,862% de umidade residual para os valores de força-g de 5 ( $X_1 = +1$ ) e concentração volumétrica de sólidos de 3% ( $X_2 = -1$ ), já o menor valor de umidade residual foi observado no experimento 11, com um valor de 19,211%, para a força-g de 3 ( $X_1 = -1$ ) e concentração volumétrica de sólidos de 5% ( $X_2 = +1$ ), mostrando a forte influência destas variáveis no teor de umidade residual dos sólidos retidos.

Para a região de piscina, o menor valor encontrado foi no experimento 12, correspondente a 906,695 cm<sup>2</sup>, para os valores de força-g de 5 ( $X_1 = +1$ ), concentração volumétrica de sólidos de 5% ( $X_2 = +1$ ), vazão de alimentação de 19 kg/min ( $X_3 = -1$ ) e inclinação da tela de 2,5° ( $X_4 = +1$ ). Já o maior valor de área de piscina foi obtido no experimento 5, com 2731,091 cm<sup>2</sup>, com os valores de força-g de 3 ( $X_1 = -1$ ), concentração volumétrica de sólidos de 3% ( $X_2 = -1$ ), vazão de alimentação de 50 kg/min ( $X_3 = +1$ ) e inclinação da tela de 0,5° ( $X_4 = -1$ ), ou seja, valores opostos em termos de níveis experimentais avaliados para o menor valor de área de piscina encontrado.

Os resultados obtidos permitem chegar à conclusão de que a capacidade operacional da peneira vibratória está diretamente relacionada a um bom controle das variáveis força-g e inclinação da tela de peneiramento, que são as passíveis de mudança por um operador em campo (SCOTT, 2006, DORRY, 2010), já que a vazão de alimentação e concentração volumétrica de sólidos variam no decorrer da operação.

A conclusão é que o aumento da força-g e/ou inclinação podem ser usados para aumentar a capacidade operacional da peneira vibratória, caso as variáveis vazão de alimentação e/ou concentração volumétrica de sólidos na alimentação oscilem.

Outra conclusão importante é que desde que a região de piscina fique longe da região de descarte de sólidos retidos, ela não influencia no teor de umidade residual dos sólidos retidos para a faixa experimental analisada.

Isso justifica a manutenção da região de piscina dentro de um limite operacional aceitável para a lubrificação da tela, visando o aumento da vida útil desta, algo que sempre deve ser considerado no processo para garantir um bom custo benefício na operação.

Para a velocidade de transporte, o maior valor observado foi para o experimento 12, com 17,00 cm/s com os valores de força-g de 5 ( $X_1 = +1$ ), concentração volumétrica de sólidos de 5% ( $X_2 = +1$ ), vazão de alimentação de 19 kg/min ( $X_3 = -1$ ) e inclinação da tela de 2,5° ( $X_4 = +1$ ). Já o menor valor de velocidade foi para os menores níveis de todas as variáveis: força-g de 3 ( $X_1 = -1$ ), concentração volumétrica de sólidos de 3% ( $X_2 = -1$ ), vazão de alimentação de 19 kg/min ( $X_3 = -1$ ) e inclinação de 0,5° ( $X_4 = -1$ ).

Estes resultados evidenciam a grande influência das variáveis força-g, concentração volumétrica de sólidos e inclinação na velocidade de transporte, valendo lembrar que a vazão é pouco influente neste caso.

Também foi observada a diminuição da porcentagem de área ocupada pelos sólidos retidos na região de praia à medida que a velocidade de transporte dos sólidos retidos aumenta. Este fato pode ser explicado pelo motivo de que maiores velocidades de transporte diminuem o tempo de residência do material sobre a tela, fazendo com que menos sólidos fiquem sobre esta.

O fato do aumento na velocidade de transporte diminuir a porcentagem de área de tela ocupada pelos sólidos retidos na região de secagem pode ser explorado para a diminuição do peso sobre a tela causado pelo acúmulo de sólidos retidos por esta, estratégia que também pode ser explorada para contribuir para o aumento da vida útil da tela.

Devido à complexidade da relação entre as diversas variáveis que afetam o processo, sendo muitas delas sequer analisadas aqui, fica evidente a dificuldade de correlacionar os fatores que influenciam a operação de peneiramento vibratório. A presença de três fases que consistem no material sólido particulado, no líquido e na interface entre estas duas fases com o ar, juntamente com diferentes regiões que se formam na peneira, como a de piscina e secagem dos sólidos, além de uma região de saída dos sólidos da região de piscina, torna difícil a predição da relação das variáveis envolvidas na operação.

A tarefa de modelagem fenomenológica deste equipamento aplicada de maneira independente nas diferentes regiões formadas na operação, certamente pode ser de grande valia para o esclarecimento de determinados comportamentos observados.

## 5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Aplicar o método de análise de imagens estudando outras variáveis como abertura da tela, granulometria dos sólidos e reologia do fluido.

Mudar o tipo de sólido utilizado no processo de peneiramento para haver maior diferenciação em relação à tonalidade entre os conglomerados e a tela, facilitando a binarização de imagem para a análise da região de secagem.

Testar outros tipos de *softwares* para tratamento das imagens, que possuam algoritmos mais eficientes para a binarização e sejam capazes de analisar vídeos, distinguir o limite entre a região de piscina e praia e medir a velocidade de transporte dos sólidos retidos. As alternativas podem ser os *softwares Image Pro Plus* e *NI Vision*, sendo este último um aplicativo do *Labview™* da *National Instruments*

Implementar um sistema de controle baseado em análise de imagem que atue na força-g e inclinação da tela da peneira, com a finalidade de manter a região de piscina longe da saída de sólidos retidos e, ao mesmo tempo, garantir um percentual de tela ocupado pela região de piscina que seja adequado para a lubrificação da tela.

Realizar trabalhos de modelagem matemática da operação de peneiramento vibratório, para esclarecer da melhor forma possível questões relacionadas principalmente ao transporte dos sólidos.



## REFERÊNCIAS

AASE, B., OMLAND, T.H., JENSEN, E.K., VESTBAKKE, A.T.L., KNUDSEN, B.S., HALDORSEN, F., NYSTED, A., STORSLETT, E.O., STEINNES, I., ELIASSEN, E.K., ENGER, J., LIE, Ø., PEIKLI, V., **Criticality Testing of Drilling-Fluid Solids-Control Equipment**, SPE Annual Technical and Exhibition, San Antonio, Estados Unidos, 2013

ABHIK, M., DEBASHISH, C., KOUSIK, B., ARPAN, H., **Development of a mass model in estimating weight-wise particle size distribution using digital image processing**, International Journal of Mining Science and Technology, v. 27, p. 435 – 443, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.03.015>

ADJIMAH M.J., **Development of a computer Program for Solids Control**, Nigeria Annual Conference and Exhibition, Lagos, Nigeria, Julho de 2013

AMERICAN ASSOCIATION OF DRILLING ENGINEERS - AADE. **Shale shakers and drilling fluid systems**. Houston, Texas: Gulf Publishing Company, 1999.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS - ASME. **Drilling Fluid Processing Handbook**, Burlington, Estados Unidos: Gulf Professional Publishing, 2005.

BARROZO, M. A. S. **Notas de aula Planejamento de experimentos**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

BICALHO, I. C.. **Estudo experimental e de simulação por CFD de escoamentos em seções anulares com excentricidade variável e obstrução parcial da coluna**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.

CALÇADA, L.A., NETO, DUQUE, O.A., MAGALHÃES, S.C., SCHEID, C.M., BORGES FILHO, M.N., WALDMANN, A.T.A, **Evaluation of suspension flow and particulate materials for control of fluid losses in drilling operation**, Journal of Petroleum Science and Engineering, v 131, p. 1 – 10, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.04.007>

CHARLES, M., SAYLE, S., **Offshore Drill Cuttings Treatment Technology Evaluation**, SPE international conference on Health, Safety and Enviromental in Oil and Gas exploration and Production, Rio de Janeiro, Brazil, Abril de 2010

CUTT, A.R. **Screen Characterization Through Image Analysis**, Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, Dallas, Texas, Estados Unidos, 1991.

DORRY, K.E., **Effect of Constant-G Control on Shale Shaker Performance**, American Association Of Drilling Engineers Fluids Conference And Exhibition, Houston, Texas, Estados Unidos, 2010.

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.

GOLOVANEVSKIY, V.A., ARSENTYEV, V.A., BLEKHMANN, I.I., VASILKOV, V.B., AZBEL, Y.I., YAKIMOVA, K.S., **Vibration-induced phenomena in bulk granular materials**, International Journal of Mineral Processing, v. 100, p. 79 – 85, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2011.05.001>

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento Digital de Imagens**, São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

GUERREIRO, F. S., **Estudo experimental do peneiramento vibratório em batelada de suspensão diluída de rocha fosfática: determinação do teor de umidade de material retido, e eficiência granulométrica e diâmetro de corte**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Uberlândia, Minas Gerais Brazil, 2015.

GUERREIRO, F.S, BARBOSA, V.P., GEDRAITE, R., ATAÍDE, C.H., **Lab Scale Vibrating Screen Study on Operational Variables that Affect the Separation Efficiency**, Materials Science Forum, v. 899, p 124 – 129, 2017. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.899.124>

GUILHERME, I.R., MARANA, A.N., PAPA, J.P., CHIACHIA, G., AFONSO, L.C.S., MIURA, K., FERREIRA, M.V.D., TORRES, F., **Petroleum well drilling monitoring through cutting image analysis and artificial intelligence techniques**, Engineering Applications of Artificial Intelligence, v. 24, p. 201 – 207, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2010.04.002>

HOBEROCK, L. L., **A Study of Vibratory Screening of Drilling Fluids**, Journal of Petroleum Technology, v. 32, 1980.

JIANG, H., DUAN, C., WU, J. ZHAO, Y., LIU, C., LUO, Z., DONG, L., ZHANG, B., WANG, Z., ZHANG, C., YU, X., **kinematics characteristics of the vibrating screen with rigid-flexible screen rod and the behavior of moist coal particles during dry deep screening process**, Powder Technology, v. 319, p. 92 – 101, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.06.036>

KHOJASTEH, P., AHMADYFARD, A., TOKHMECHI, B., MIRMAHDAVI, S.A., **Automatic detection of formations using images of well drilling cuttings**, Journal of Petroleum Science and Engineering, v. 125, p. 67 – 74, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2014.10.023>

KING, R. P., **Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.

LARSON, T.R. **API RP 13C D100 Values, Split Curves, and Separation**, AADE National Conference and Exhibition, Houston, Texas, Estados Unidos, Abril de 2007.

LIAO, C.W., TARNG, Y.S., **On-line automatic optical inspection system for coarse particle size distribution**, Powder Technology, v. 189, p. 508 – 513, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.08.013>

MAKINDE, O.A., RAMATSETSE, B.I., MPOFU, K., **Review of vibrating screen development trends: Linking the past and the future in mining machinery industries**, International Journal of Mineral Processing, v. 145, p. 17 – 22, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2015.11.001>

MATTA, E.N., ASSIS, W.O., GOMES, M.M., BARBOSA, V.P., GEDRAITE, R., ATAÍDE, C.H., **Contribuição para o melhor aproveitamento de fluido de perfuração de poços de petróleo – uma abordagem utilizando processamento de imagem**. Anais do XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, São Carlos, São Paulo, Brasil, 2015.

MYERS, R.H., MONTGOMERY, D.C., ANDERSON-COOK, C., **Response Surface Methodology**, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, Estados Unidos, 2016.

RAJA, V., **Shale Shaker Model and Experimental Validation**. Tese de Doutorado University of Akron, Chemical Engineering, Akron, Estados Unidos, 2012.

RAJA, V., CHASE, G.G., JONES, B.N., GEEHAN, T., **Computational modeling and Experiments on Shale Shaker Performance**, AADE Fluids Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, Estados Unidos, 2012.

RAJA, V., CHASE, G.G., JONES, B.N., GEEHAN, T., **Continuum Model of a Shale Shaker**. American Association Of Drilling Engineers Fluids Technical Conference And Exhibition, Houston. Texas, Estados Unidos, 2010.

ROGERS, R.S.C., BRAME, K.A., **An Analysis of the High-Frequency Screening of Fine Slurries**. Powder Technology, v. 42, p. 297-304, 1985. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(85\)80069-3](https://doi.org/10.1016/0032-5910(85)80069-3)

RONDET, E., DELALONDE, M., CHUETOR, S., RUIZ, T., **Modeling of granular material's packing: Equivalence between vibrated solicitations and consolidation**, Powder Technology, v. 310, p.287 – 294, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.12.056>

SCOTT, E.L., **Automatic Shaker Control**., IADC/SPE Drilling Conference, Miami, Florida, Estados Unidos, 2006.

THOMAS, J.E., **Fundamentos de engenharia do petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência: Petrobras, 2001.

WARREN, B.K., BALTOIU, L.V., DYCK R.G., **Development and Field Results of a Unique Drilling Fluid Designed for Heavy Oil Sands Drilling**, SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, Holanda, Fevereiro de 2005.

YIN, Z., ZHANG, H., HAN, T., **Simulation of particle floe on an elliptical vibrating screen using the discrete element method**, Powder Technology, v. 302, p. 443 – 454, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.08.061>

## APÊNDICE A

**Tabela A.1:** Resultados experimentais para as variáveis analisadas

Exp	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$U(\%)$	$A_{Piscina}(cm^2)$	$v(cm / s)$	$A_{Sólidos}(\%)$
1	-1	-1	-1	-1	21,27	1921,2	2,95 1,85	56,36
					20,73	1798,81	2,2 2,24	58,95
					20,58	1838,59	2,78 2,03	62,22
					21,94	1960,96	5,08 6,93	30,98
					21,97	1926,49	8,57 9,07	31,28
					21,78	1868,36	7,37 6,31	33,64
2	+1	-1	-1	-1	20,47	1240,69	10,42 12,19	26,64
					19,38	1251,91	10,68 6,02	25,10
					19,03	1261,72	10,21 7,48	27,29
					21,87	1254,03	16,21 17,66	10,79
					22,14	1195,02	16,63 13,61	10,47
					22,50	1222,95	12,73 13,16	12,92
3	-1	+1	-1	-1	20,13	2648	6,91 4,37	47,8
					20,43	2788,04	6,45 4,53	46,52
					20,95	2756,24	5,11 2,76	44,42
					22,26	2257,64	10,96 8,06	24,57
					22,46	2265,99	9,28 11,85	26,1
					22,58	2239,21	10,45 11,48	24,84
4	+1	+1	-1	-1	20,30	2202,4	6,07 10,16	49,46
					20,61	2142,51	6,96 4,91	48,80
					20,03	2077,30	6,01 7,57	45,68
					20,88	1476,95	15,73 14,09	13,1
					20,34	1339,29	15,91 15,69	11,88
					20,59	1324,82	15,77 16,89	12,87
5	-1	-1	+1	-1				
6	+1	-1	+1	-1				
7	-1	+1	+1	-1				
8	+1	+1	+1	-1				



18	0	0	0	0	22,34	1283,32	13,68	14,79
					21,70	1304,14	14,08	15,44
					21,74	1269,82	14,67	10,48
							8,03	14,87
19	$-\alpha$	0	0	0	20,79	1455,82	4,89	57,86
					20,71	1497,98	5,47	54,14
					20,53	1505,79	4,64	55,87
							6,31	
20	$+\alpha$	0	0	0	23,11	1154,98	4,15	11,69
					22,23	1111,82	5,01	11,02
					22,27	1229,68	16,77	12,06
							15,77	
21	0	$-\alpha$	0	0	21,47	1863,64	15,02	34,2
					21,46	1828,02	11,67	34,77
					21,48	1849,72	12,27	36,1
							12,65	
22	0	$+\alpha$	0	0	20,19	1194,78	7,93	13,04
					20,16	1176,87	4,81	12,19
					19,79	1263,52	6,36	11,79
							7,57	
23	0	0	$-\alpha$	0	23,55	1020,96	10,08	11,01
					22,59	1000,39	9,08	6,67
					21,82	1053,46	15,25	9,60
							14,86	
24	0	0	$+\alpha$	0	21,16	1636,25	15,6	14,65
					21,80	1537,56	11,53	14,15
					21,75	1543,4	12,39	14
							11,79	
25	0	0	0	$-\alpha$	21,87	1450,64	14,37	22,62
					21,57	1455,66	14,80	26,69
					21,86	1464,83	15,48	19,69
							10,36	
26	0	0	0	$+\alpha$	20,51	1084,54	13,04	12,96
					19,99	1026,59	11,78	14,67
					20,15	1015,02	10,86	12,73
							11,19	

## APÊNDICE B

Foi realizado o ajuste através de um modelo de segunda ordem para os resultados obtidos pelo planejamento composto central realizado, a Equação (B.1) mostra o modelo de equação de segunda ordem (MYERS *et al*, 2016).

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

Com os dados dos experimentos é possível estimar os valores dos parâmetros  $\beta_0$ ,  $\beta_i$ ,  $\beta_{ii}$  e  $\beta_{ij}$  através de ajuste utilizando o método dos mínimos quadrados. Os parâmetros, quando estimados, são chamados de estimadores dos mínimos quadrados, denotados por  $b_0$ ,  $b_i$ ,  $b_{ii}$  e  $b_{ij}$  respectivamente, sendo o ajuste demonstrado pela Equação (B.2) (BARROZO, 2017)

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

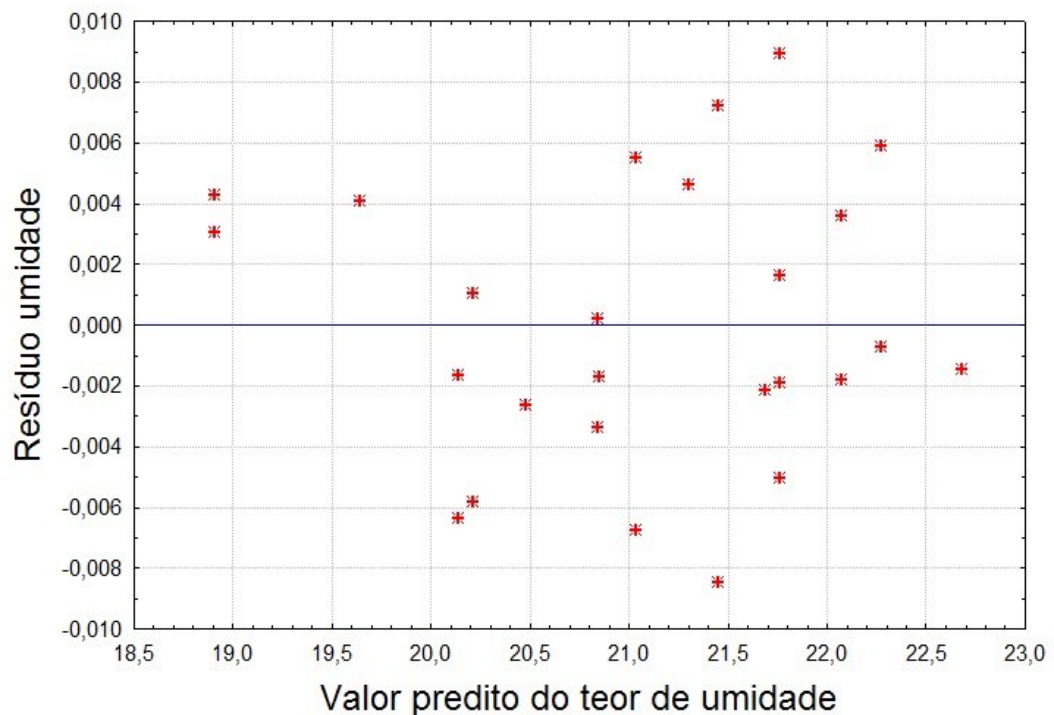


## APÊNDICE C

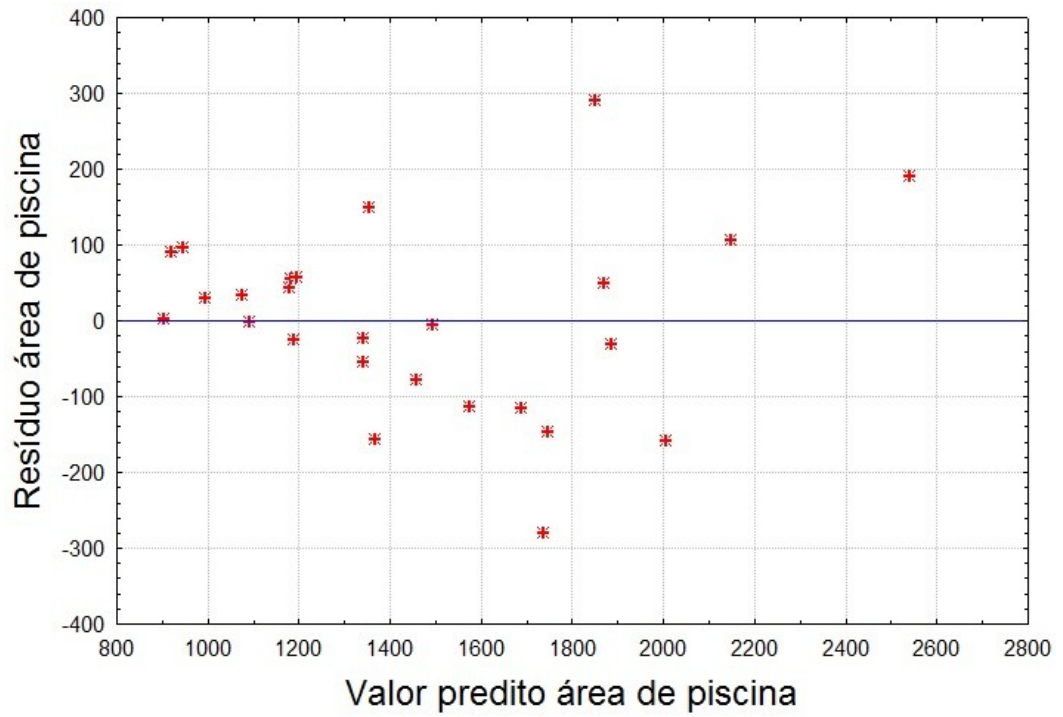
Os resíduos são a diferença entre o valor obtido e o valor predito pelo modelo ajustado para a variável resposta, dado pela Equação (C.1) e são um importante parâmetro para o julgamento da adequação do modelo (MYERS *et al*, 2016).

$$\hat{\varepsilon} = y_i - \hat{y}_i \quad (C.1)$$

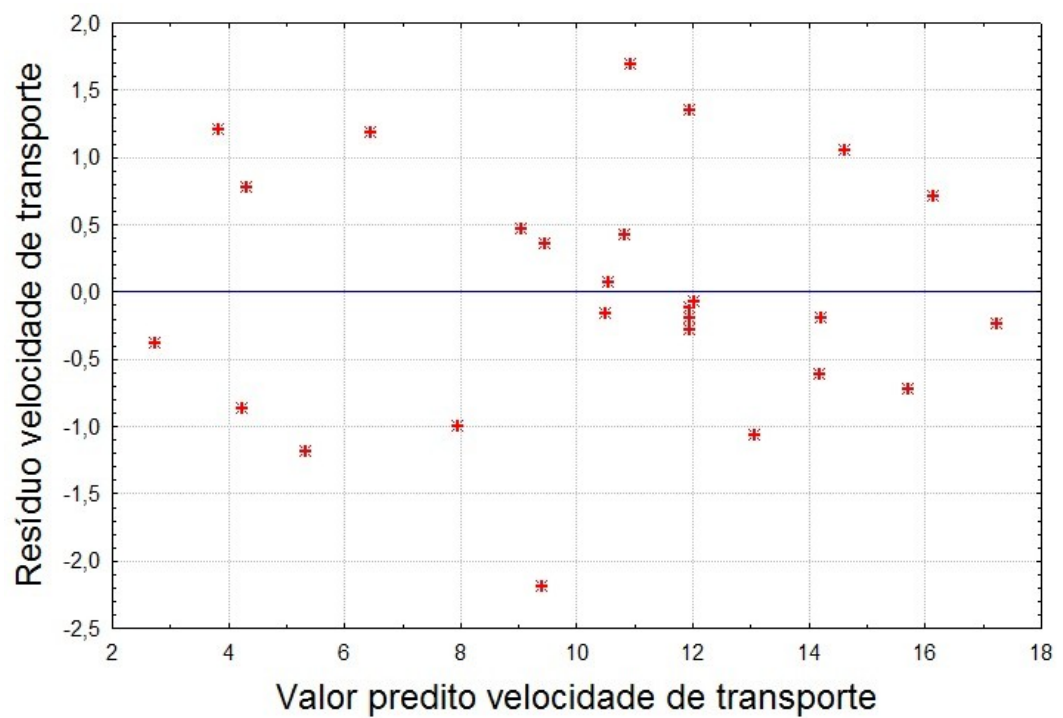
A partir da análise dos resíduos é possível inferir se houve algum fator não contabilizado que interferiu nos resultados experimentais. Para garantir a confiabilidade em relação aos resultados obtidos e o ajuste realizado, a análise dos resíduos é imprescindível. Ela consiste em verificar se os resíduos estão aleatoriamente distribuídos em torno do valor zero do erro quando plotados em um gráfico resíduo VS experimento. A análise dos resíduos é apresentada nos gráficos a seguir:



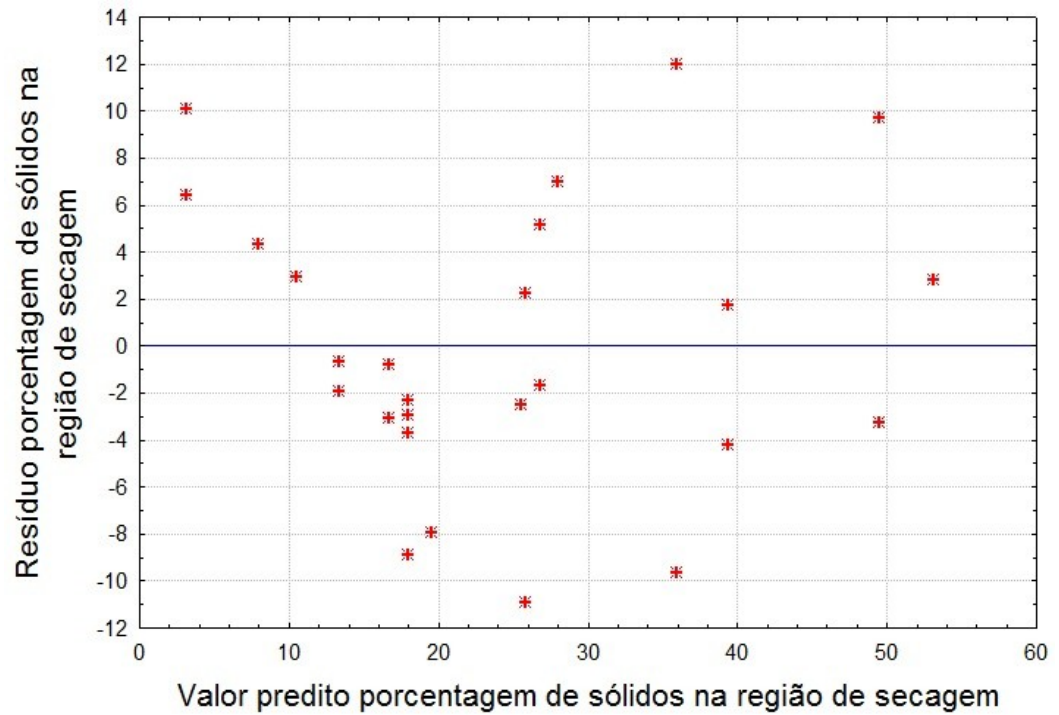
**Figura A.9.1:** Gráfico dos resíduos do teor de umidade residual dos sólidos retidos



**Figura A.9.2:** Gráfico dos resíduos da área de piscina.



**Figura A.9.3:** Gráfico dos resíduos da velocidade de transporte dos sólidos retidos.



**Figura A.9.4:** Gráfico dos resíduos da porcentagem de área de tela ocupada pelos sólidos úmidos retidos na região de praia.

Pela análise dos resíduos, é possível verificar que estes ficaram bem distribuídos em torno do valor zero, sinal de que as variáveis operacionais influentes para a faixa experimental executada são as significativas para o processo, não havendo efeito de outras variáveis não contabilizadas.