



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



**MODELAGEM FENOMENOLÓGICA DO ESCOAMENTO DE FLUIDO  
DE PERFURAÇÃO EM PENEIRAS VIBRATÓRIAS**

**MONIQUE CRISTINA VIANA PEREIRA**

Uberlândia – MG

2017



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



Modelagem Fenomenológica do Escoamento de Fluido de Perfuração em  
Peneiras Vibratórias

Monique Cristina Viana Pereira

Orientadores: Valéria Viana Murata  
Luís Cláudio Oliveira Lopes

Dissertação submetida 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.

Uberlândia – MG

2017

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

---

P436m      Pereira, Monique Cristina Viana, 1991-  
2017      Modelagem fenomenológica do escoamento de fluido de perfuração  
em peneiras vibratórias / Monique Cristina Viana Pereira. - 2017.  
43 f. : il.

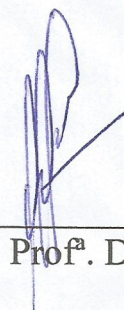
Orientador: Valéria Viana Murata.  
Coorientador: Luís Cláudio Oliveira Lopes.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.  
Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.219>  
Inclui bibliografia.

1. Engenharia química - Teses. 2. Poços de petróleo - Fluidos de  
perfuração - Teses. 3. Modelos matemáticos - Teses. 4. Minimização de  
resíduos - Teses. I. Murata, Valéria Viana. II. Lopes, Luís Cláudio  
Oliveira. III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Química. IV. Título.

CDU: 66.0

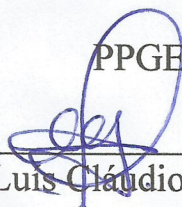
**Dissertação** de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química em 30 de agosto de 2017.

BANCA EXAMINADORA



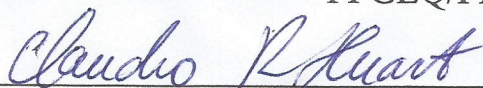
---

Prof. Dr.ª. Valéria Viana Murata  
Orientadora  
PPGEQ/FEQUI/UFU



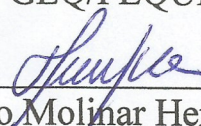
---

Prof. Dr. Luis Cláudio Oliveira Lopes  
Orientador  
PPGEQ/FEQUI/UFU



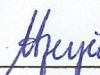
---

Prof. Dr. Cláudio Roberto Duarte  
PPGEQ/FEQUI/UFU



---

Prof. Dr. Humberto Molinar Henrique  
FEQUI/UFU



---

Prof. Dr.ª. Adriene Artiaga Pfeifer  
DEQ/UFTM

---

Participação por meio de videoconferência

---

Dr. André Leibsohn Martins  
CENPES/PETROBRAS

*Aos meus pais por todo o amor e apoio.*

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus por me conceder a vida e permitir a conclusão de mais essa etapa.

À minha família e, em especial, aos meus pais Mônica e Emanuel e ao meu irmão Lucas por acreditarem no meu potencial e me incentivarem a seguir o caminho do conhecimento.

Ao Paulo por todo amor, companheirismo e compreensão durante esses anos e por sempre me motivar a continuar.

Aos meus orientadores Valéria e Luís Cláudio pela oportunidade de trabalhar neste projeto e por todos os ensinamentos transmitidos durante o mestrado.

Às amigas maravilhosas criadas e cultivadas em Uberlândia que tornaram este período mais divertido e memorável. Amanda, Hellen, Raquel, Nara, Mina e, claro, Marília que me incentivou para que tudo isso acontecesse. Muito obrigada, meninas!

Aos meus colegas de LOM e de projeto Jeniffer, Marielle, Michel, Cleuton, Vinicius e Anderson que colaboraram para a concretização deste projeto.

Aos funcionários da Faculdade de Engenharia Química e ao corpo docente do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da UFU pelos ensinamentos e auxílio.

À FAPEMIG e à PETROBRAS pelo apoio técnico e financeiro.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>i</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>iv</b>
<b>NOMENCLATURA .....</b>	<b>v</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>viii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>ix</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2 ASPECTOS DA SEPARAÇÃO DE SÓLIDOS E FLUIDO DE PERFURAÇÃO.....</b>	<b>5</b>
2.1 Perfuração de Poços.....	5
2.2 Fluidos de Perfuração .....	7
2.2.1 Características de um Fluido de Perfuração.....	8
2.2.2 Tipos e Composição do Fluido de Perfuração .....	10
2.3 Sistema de Controle de Sólidos e Recuperação do Fluido de Perfuração .....	11
2.4 Peneiras Vibratórias.....	13
2.5 Telas (Superfície de Peneiramento).....	17
2.6 Análise de Modelos de Peneiramento Vibratório.....	20
<b>3 MODELAGEM MATEMÁTICA DO ESCOAMENTO DE UM FLUIDO SOBRE UMA TELA.....</b>	<b>25</b>
3.1 Aplicação da segunda lei de Newton ao volume de controle diferencial.....	26
3.1.1 Balanço das componentes das forças paralelas à tela (direção x).....	26
3.1.2 Balanço das componentes das forças perpendiculares à tela (direção y).....	29
3.1.3 Aplicação da lei da conservação da massa ao volume de controle.....	31
3.2 Proposta de uma correlação para a queda de pressão através de uma tela .....	32
3.2.1 Análise do escoamento na região laminar.....	34
3.2.2 Análise do escoamento na região turbulenta .....	36
3.3 Metodologia de resolução do modelo proposto.....	39
3.4 Estabelecimento das condições de contorno e operacionais para a simulação.....	42
3.5 Estabelecimento da condição de escoamento do fluido através da tela .....	46
3.6 Condições de simulação e algoritmo de solução numérica. ....	46

<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>49</b>
4.1	Análise de correlações para a queda de pressão de um plástico de Bingham durante o escoamento através de uma tela.....	49
4.2	Avaliação do efeito de parâmetros operacionais sobre a capacidade de processamento de uma peneira vibratória .....	54
4.2.1	Efeito da viscosidade plástica do fluido sobre o comprimento de tela molhada .....	54
4.2.2	Efeito da tensão limite de escoamento sobre o comprimento de tela molhada.....	57
4.2.3	Efeito da inclinação sobre o comprimento de tela molhada .....	61
4.2.4	Efeito da força-g sobre o comprimento de tela molhado .....	64
4.2.5	Efeito do coeficiente de escoamento sobre o comprimento de tela molhada .....	68
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>75</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>77</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Consumo mundial de energia primária ao longo dos anos.....	2
Figura 2.1 – Sonda de perfuração rotativa.....	6
Figura 2.2 – Perfuração de uma formação rochosa.....	7
Figura 2.3 – Classificação de um fluido de acordo com seu comportamento reológico.....	8
Figura 2.4 – Sistema de controle de sólidos.....	12
Figura 2.5 – Peneira vibratória.....	14
Figura 2.6 – Movimento elíptico não balanceado.....	15
Figura 2.7 – Movimento vibratório circular.....	16
Figura 2.8 – Movimento vibratório linear.....	17
Figura 2.9 – Movimento elíptico balanceado.....	17
Figura 2.10 – Telas (a) quadrada e (b) retangular simples.....	18
Figura 2.11 – Regiões de separação sólido-líquido sobre a tela de uma peneira vibratória.....	22
Figura 2.12 – Regiões de separação em uma peneira com inclinação descendente.....	23
Figura 3.1 – Representação das forças de superfície atuando sobre o volume de controle diferencial.....	25
Figura 3.2 – Queda de pressão na direção y.....	39
Figura 3.3 – Representação da altura inicial de fluido sobre a tela.....	43
Figura 3.4 – Amostra de uma tela quadrada de mesh 175x175.....	44
Figura 3.5 – Algoritmo de solução implementado em Scilab.....	48
Figura 4.1- Correlações de Hoberock para a queda de pressão para uma solução de Carbopol-941 0,5% em uma tela de mesh 175x175.....	50
Figura 4.2 – Correlações para a queda de pressão para uma solução de Carbopol-941 0,5% em uma tela de mesh 175x175.....	50
Figura 4.3 – Correlações de Hoberock para a queda de pressão para uma solução de goma xantana 0,1% em uma tela de mesh 175x175.....	51

Figura 4.4 - Correlações para a queda de pressão para uma solução de goma xantana 0,1% em uma tela de mesh 175x175.....	51
Figura 4.5 – Correlação de Hoberock para a queda de pressão para uma solução de goma xantana 0,5% em uma tela de mesh 175x175.....	52
Figura 4.6 – Correlações para a queda de pressão para uma solução de goma xantana 0,5% em uma tela de mesh 175x175.....	52
Figura 4.7 – Correlações de Hoberock para a queda de pressão para uma solução de n-parafina em uma tela de mesh 175x175.....	53
Figura 4.8 – Correlações para a queda de pressão para uma solução de n-parafina em uma tela de mesh 175x175.....	53
Figura 4.9 – Efeito da viscosidade plástica sobre a altura da coluna de fluido sobre a tela.....	55
Figura 4.10 - Efeito da viscosidade plástica sobre a velocidade de fluido ao longo da tela.....	55
Figura 4.11 – Efeito da viscosidade plástica sobre a velocidade da passagem de fluido através da tela.....	56
Figura 4.12 – Efeito da viscosidade plástica sobre a queda de pressão através da tela.....	56
Figura 4.13 – Efeito da viscosidade plástica sobre a capacidade de processamento da peneira.....	57
Figura 4.14 – Efeito da tensão de escoamento sobre a altura da coluna de fluido sobre a tela.....	58
Figura 4.15 - Efeito da tensão de escoamento sobre a velocidade de fluido ao longo da tela.....	59
Figura 4.16 - Efeito da tensão de escoamento sobre a velocidade da passagem de fluido através da tela.....	59
Figura 4.17 – Efeito da tensão de escoamento sobre a queda de pressão através da tela.....	60
Figura 4.18 – Efeito da tensão de escoamento sobre a capacidade de processamento da peneira.....	60
Figura 4.19 – Efeito da inclinação sobre a altura da coluna de fluido sobre a tela.....	61

Figura 4.20 – Efeito da inclinação sobre a velocidade de fluido ao longo da tela.....	62
Figura 4.21 – Efeito da inclinação sobre a velocidade da passagem de fluido através da tela.....	62
Figura 4.22 – Efeito da inclinação sobre a queda de pressão através da tela.....	63
Figura 4.23 - Efeito da inclinação sobre a capacidade de processamento da peneira.....	63
Figura 4.24 – Efeito da força-g sobre a altura da coluna de fluido sobre a tela.....	64
Figura 4.25 - Efeito da força-g sobre a velocidade de fluido ao longo da tela.....	65
Figura 4.26 - Efeito da força-g sobre a velocidade da passagem de fluido através da tela.....	65
Figura 4.27- Efeito da força-g sobre a queda de pressão através da tela.....	66
Figura 4.28 - Efeito da inclinação sobre a capacidade de processamento da peneira.....	66
Figura 4.29 – Efeito do coeficiente de rendimento sobre a altura da coluna de fluido sobre a tela.....	69
Figura 4.30 - Efeito do coeficiente de escoamento sobre a velocidade de fluido ao longo da tela.....	69
Figura 4.31 – Efeito do coeficiente de escoamento sobre a velocidade da passagem de fluido através da tela.....	70
Figura 4.32 – Efeito do coeficiente de escoamento sobre a queda de pressão através da tela.....	70
Figura 4.33 – Efeito do coeficiente de escoamento sobre a capacidade de processamento da peneira.....	71
Figura 4.34 – Efeito do coeficiente de escoamento sobre a altura da coluna de fluido sobre a tela para um fluido a base de Carbopol-941.....	72
Figura 4.35 - Efeito do coeficiente de escoamento sobre a velocidade de fluido ao longo da tela para um fluido a base de Carbopol-941.....	73
Figura 4.36 – Efeito do coeficiente de escoamento sobre a velocidade da passagem de fluido através da tela para um fluido a base de Carbopol-941.....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Designação API.....	19
Tabela 3.1 – Parâmetros para uma tela de mesh 175x175.....	44
Tabela 3.2 – Dados experimentais para o cálculo da porosidade da tela.....	45
Tabela 3.3 – Constantes empíricos e parâmetros de operação da peneira.....	45
Tabela 3.4 – Parâmetros reológicos dos fluidos simulados.....	47
Tabela 4.1 – Efeito da viscosidade para uma vazão de alimentação de $1,6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .....	54
Tabela 4.2 – Efeito da tensão de escoamento para uma vazão de alimentação de $1,6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .....	58
Tabela 4.3 – Efeito da inclinação da tela para uma vazão de alimentação de $1,6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .....	61
Tabela 4.4 – Efeito da força-g para uma vazão de alimentação de $1,6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .....	64
Tabela 4.5 – Efeito da força-g para uma vazão de alimentação de $3,16 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ e inclinação de $1^\circ$ .....	67
Tabela 4.6 – Efeito da força-g para uma vazão de alimentação de $3,16 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ e inclinação de $3^\circ$ .....	67
Tabela 4.7 – Efeito da força-g aplicada à direção y com $\theta=3^\circ$ e $\eta=1$ .....	68
Tabela 4.8 – Efeito da força-g aplicada à direção x com $\theta=0^\circ$ e $\eta=0,9$ .....	68
Tabela 4.9 – Efeito do coeficiente de escoamento para uma vazão de alimentação de $1,6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .....	68
Tabela 4.10 – Efeito do coeficiente de escoamento para uma vazão de alimentação de $3,16 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ .....	71
Tabela 4.11 – Síntese dos resultados obtidos com a variação de parâmetros operacionais da peneira e do fluido.....	74

## NOMENCLATURA

$a$	Área superficial específica do fio da tela	$m^{-1}$
$A_{ef}$	Área da seção reta de uma esfera	$m^2$
$A_{esfera}$	Área superficial de uma partícula esférica	$m^2$
$A_{tubo}$	Área superficial de um tubo cilíndrico	$m^2$
$a_x$	Componente da aceleração da tela na direção x	$m.s^{-2}$
$a_y$	Componente da aceleração da tela na direção y	$m.s^{-2}$
$b$	Espessura da tela	$m$
$B$	Espessura corrigida da tela	$m$
$c_0$	Constante empírica de Zhu	-
$C_a$	Coefficiente de arrasto	-
$D$	Diâmetro do poro da tela	$m$
$d_f$	Diâmetro do fio	$m$
$dm$	Massa do elemento de controle diferencial	$kg$
$f_0$	Fator de tortuosidade da tela	-
$f$	Fator de fricção	-
$F$	Força de arrasto	$N$
$F_{at}$	Força de atrito entre o fluido e a tela	$N$
$F_N$	Força de reação da tela normal à sua superfície	$N$
$F_{p,x}$	Componente da força peso na direção x	$N$

$F_{p,y}$	Componente da força peso na direção y	N
$F_{tubo}$	Força de atrito através de um tubo cilíndrico	N
$F_{tt}$	Força de atrito total através dos tubos	N
$g$	Aceleração da gravidade	m.s <sup>-2</sup>
$h_0$	Altura inicial de fluido sobre a tela	m
$h$	Altura da coluna de líquido sobre a tela correspondente ao eixo y	m
$h_{fluido}$	Altura da coluna de líquido sobre a tela	m
$He$	Número de Hedstrom	-
$I$	Grau de interação entre partículas em um leito	-
$K$	Energia cinética característica	kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-2</sup>
$L$	Comprimento da tela	m
$n$	Contagem mesh da tela	fios.in <sup>-1</sup>
$n_p$	Número de partículas em um leito	-
$n_t$	Número de tubos cilíndricos em um leito	-
$\Delta P_{inercial}$	Queda de pressão inercial através da tela	Pa
$\Delta P_{tela}$	Queda de pressão através da tela	Pa
$\Delta P_{viscosa}$	Queda de pressão viscosa através da tela	Pa
$\Delta P_H, \Delta P'_H, \Delta P_{CD}, \Delta P_Z$	Correlações para a queda de pressão através da tela	Pa
$P_x$	Componente da pressão na direção x	Pa
$P_y$	Componente da pressão na direção y	Pa

$Q_0$	Vazão volumétrica alimentada ao sistema	$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
$r$	Raio da esfera	m
$Re$	Número de Reynolds	-
$u_y$	Componente da velocidade do fluido na direção	$\text{m}.\text{s}^{-1}$
$u_{y_0}$	Componente y da velocidade do fluido no contorno $y = 0$	$\text{m}.\text{s}^{-1}$
$V_{esfera}$	Volume da partícula esférica	$\text{m}^3$
$V_{leito}$	Volume do leito empacotado	$\text{m}^3$
$V_{tubo}$	Volume de um tubo cilíndrico	$\text{m}^3$
$v_x$	Componente da velocidade do fluido na direção x	$\text{m}.\text{s}^{-1}$
$v_y$	Componente da velocidade do fluido na direção y	$\text{m}.\text{s}^{-1}$
$Z$	Largura da tela	m
$\alpha, \beta \text{ e } \gamma$	Constantes empíricas	-
$\varepsilon$	Porosidade da tela	-
$\eta$	Coefficiente de escoamento	-
$\theta$	Ângulo de inclinação da tela	°
$\mu_0$	Viscosidade plástica de um fluido	$\text{Pa}.\text{s}$
$\rho$	Densidade do fluido	$\text{kg}.\text{m}^{-3}$
$\rho_c$	Densidade relativa do Carbopol-941	$\text{kg}.\text{m}^{-3}$
$\rho_t$	Densidade do fio da tela	$\text{kg}.\text{m}^{-3}$
$\tau_0$	Tensão limite de escoamento	Pa

## RESUMO

Os fluidos de perfuração são substâncias injetadas no poço cuja principal função é trazer à superfície os cascalhos de rocha produzidos durante a perfuração. A separação e a reutilização do fluido de perfuração são de suma importância para que se atenda às exigências da legislação ambiental em relação ao descarte de resíduos. Além disso, é imprescindível a recuperação do fluido utilizado por questões de redução de custos da etapa de perfuração. O objetivo do presente estudo foi desenvolver um modelo matemático para a separação entre cascalho e fluido de perfuração por peneiras vibratórias com base nos princípios da dinâmica newtoniana e da lei de conservação de massa. Para tanto a tela da peneira foi considerada um leito empacotado de espessura muito fina e com inclinação ascendente. Correlações para a queda de pressão foram analisadas e uma nova correlação foi proposta com base em metodologias indicadas na literatura. O comportamento do fluido foi avaliado para a variação nos seguintes parâmetros: viscosidade plástica, tensão limite de escoamento, coeficiente de escoamento, inclinação da tela e força-g. O modelo não se mostrou sensível a variações na tensão limite de escoamento do fluido. Os demais parâmetros mostraram significativa influência sobre o comprimento de tela molhada. Os resultados obtidos estão de acordo com o relatado pela literatura e mostram que o modelo desenvolvido é adequado para a descrição do processo de peneiramento vibratório.

Palavras-chave: *Peneiras Vibratórias; Fluido de Perfuração; Modelagem do Peneiramento.*



## ABSTRACT

Drilling fluids are substances injected into the well whose main function is to suspend drilled solids, remove them from the well bore and release them at the surface. Separation and reuse of drilling fluids is of great importance to fulfill the requirements of environmental legislation regarding waste disposal. In addition, it is essential to recover the drilling fluid in order to reduce costs of the drilling process. The objective of the present study was to develop a mathematical model based on the principles of Newtonian dynamics and the law of mass conservation for the process of removal of drilled cuttings from drilling fluid using vibrating screens. For this purpose, the sieve screen was considered to be a very thin packed bed and tilted upward. Pressure drop correlations were analyzed and a new correlation was proposed based on methodologies indicated in the literature. The behavior of the fluid was evaluated for the variation in the following parameters: plastic viscosity, yield stress, flow coefficient, tilt of the screen and g factor. The model was not sensitive to variations in the yield stress of the fluid while other parameters showed a significant influence on wet screen length. Obtained results are in agreement with the reported ones in the literature and show that the developed model is suitable for the description of the process of vibrating screening.

**Keywords:** *Shale Shakers; Drilling Fluid; Sieving Modeling.*

---

---

# CAPÍTULO 1

---

---

## INTRODUÇÃO

O petróleo é um combustível fóssil altamente inflamável composto por diversos hidrocarbonetos e por outras substâncias consideradas “impurezas” como compostos sulfurados, nitrogenados, oxigenados e metálicos (THOMAS *et al.*, 2001). Matéria orgânica formada por uma série de transformações químicas ao longo de milhares de anos, o petróleo pode ser extraído em terra (*onshore*) ou abaixo do assoalho oceânico (*offshore*). A indústria de exploração do petróleo como conhecemos hoje teve seu início com a descoberta de um poço na Pensilvânia (EUA) pelo Cel. Drake em 1859. O processo de destilação do petróleo dava origem a derivados versáteis em suas aplicações e que, consequentemente, ocasionaram o aumento na margem de lucros da atividade de exploração. A partir dessa percepção deu-se início a grandes investimentos no setor para o desenvolvimento das tecnologias de perfuração de poços, extração e refino do petróleo.

Devido ao seu alto valor energético agregado e à ampla utilidade de seus derivados em nosso cotidiano o petróleo se consolidou no cenário mundial como principal fonte de energia utilizada. Isso o torna um produto estratégico no delineamento das políticas internas e externas em países produtores causando também grande impacto na economia mundial.

Segundo o *BP Statistical Review of World Energy* (BRITISH PETROLEUM, 2017), o consumo de petróleo no ano de 2016 foi equivalente a aproximadamente um terço de todo o consumo energético mundial conforme apresentado na Figura 1.1. Pode-se observar o aumento da demanda nos últimos dois anos contrário ao declínio constante nos 15 anos anteriores.

Com relação ao cenário nacional, dados do Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis da Agência Nacional do Petróleo (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2016) apontam que em 2015 a produção nacional apresentou um crescimento de 8,1% colocando o Brasil na 12ª colocação no

*ranking* mundial de produtores de petróleo. Esse aumento significativo se deve à elevada produção no pré-sal (55,7% de crescimento em relação ao ano anterior).

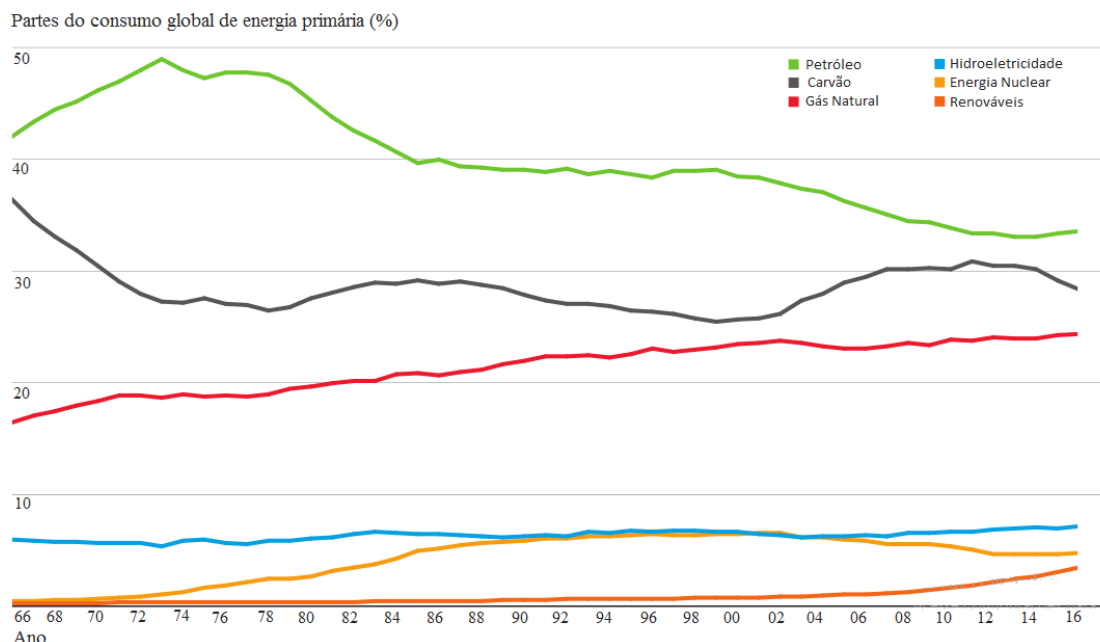


Figura 1.1 – Consumo mundial de energia primária ao longo dos anos. Adaptado de: BP Statistical Review of World Energy (BRITISH PETROLEUM, 2017).

Dada a importância dessa indústria para a política e a economia mundial todos os aspectos relacionados desde a exploração e perfuração de um poço até o refino do petróleo extraído são objetos de estudos que buscam a melhoria de tais processos. O processo de separação ao qual este trabalho se dedica está vinculado à etapa de perfuração de poços. Etapa essa na qual injeta-se um fluido através da coluna de perfuração e o mesmo retorna à superfície trazendo consigo sólidos provenientes da formação rochosa perfurada. A reutilização do fluido de perfuração é de suma importância para a redução dos custos de produção de um poço. Durante anos a recirculação do fluido ocorria após a adição de água para que suas características reológicas fossem mantidas. Porém, a não dissolução de alguns fragmentos de rocha acarretava em alguns problemas de entupimento do equipamento e formação de torta no poço que se tornava espessa com o tempo impedindo a realização do bombeamento (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2005).

A solução encontrada para os problemas descritos foi a inserção de peneiras vibratórias para a remoção do cascalho (fragmentos da formação rochosa perfurada). Ainda de acordo com AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (2005) esses

equipamentos eram muito utilizados por indústrias mineradoras e passaram por diversas modificações para se adequarem à etapa de recuperação do fluido de perfuração usado na perfuração de poços de petróleo. Companhias petrolíferas passaram a investir em pesquisas para o avanço da tecnologia do processo de separação e outros equipamentos para a remoção de partículas menores que aquelas retidas pela tela das peneiras foram incluídos no processo de separação. Até os dias atuais a peneira vibratória permanece como o principal equipamento do sistema de controle de sólidos e um indicador da eficiência de separação desse sistema.

Além dos fatores operacionais supracitados, tem-se ainda a questão ambiental como fator de grande relevância ligado à necessidade de inserção de um sistema de controle de sólidos à etapa de perfuração de poços. No Brasil, o descarte de resíduos sólidos oriundos de atividades industriais, incluindo a exploração e produção de petróleo, é regulamentado pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010). Os limites estabelecidos pela legislação ambiental quanto ao teor de resíduo orgânico de fluido aderido ao cascalho a ser descartado são de 6,9% para base hidrocarbônica e 9,4% para base éster por peso de cascalho úmido.

O interesse no potencial de poluição do ambiente marinho causado pelo descarte inadequado de cascalho (sólidos de perfuração) suscitou o desenvolvimento de estudos acerca da toxicidade dos fluidos de perfuração em ambiente aquático. Segundo SCHAFFELL (2002), em 1978, a Agência de Proteção Ambiental norte-americana (EPA) passou a conceder licenças de perfuração sob a condição de que as empresas participassem de um programa de bioensaios em fluidos de perfuração à base de água. Esse projeto levou à determinação de um fluido que passou a servir como parâmetro de toxicidade à base de potássio e polímeros.

MARIANO (2007) afirma que o principal problema ambiental dos fluidos de perfuração aderidos ao cascalho removido das rochas está relacionado à presença de lubrificantes que contém quantidades consideráveis de hidrocarbonetos estáveis e tóxicos.

Com base nos motivos aqui explanados percebe-se a importância de se examinar e compreender os fenômenos que regem o peneiramento vibratório da lama de perfuração proveniente de um poço perfurado. O presente estudo apresenta uma análise dos fenômenos físicos envolvidos neste processo com o objetivo de definir condições operacionais e configurações de uma peneira vibratória que resultem na maior capacidade deste equipamento em processar a lama de perfuração. Para tanto foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um modelo matemático distribuído para a previsão da capacidade de processamento de fluido de perfuração ao longo da tela;
- Avaliar o efeito de variações nos parâmetros operacionais e na geometria da tela da peneira vibratória sobre esta capacidade de processamento do fluido;
- Identificar através de simulações, para fluidos de base aquosa e de base não aquosa, a configuração da peneira e os valores dos parâmetros operacionais que resultem na maior capacidade de processamento;
- Verificar o modelo obtido com base em resultados presentes na literatura.

A dissertação apresenta em seu Capítulo 2 uma revisão bibliográfica acerca do fluido de perfuração e do processo de separação do cascalho da lama de perfuração. Além disso, são abordados modelos de peneiramento vibratório descritos na literatura. No Capítulo 3 é descrita a metodologia de desenvolvimento do modelo matemático. São definidas as condições de contorno e operacionais usadas nas simulações e apresenta-se o algoritmo de solução numérica do modelo. No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos através das simulações computacionais. Nele são avaliados os efeitos da variação de parâmetros operacionais sobre a capacidade de processamento de uma peneira vibratória além de uma análise de correlações presentes na literatura para a queda de pressão no escoamento de plásticos de Bingham através de uma tela. Encerra-se a dissertação no Capítulo 5 com as conclusões obtidas a partir do estudo realizado e sugestões para trabalhos futuros.

---

---

# CAPÍTULO 2

---

---

## ASPECTOS DA SEPARAÇÃO DE SÓLIDOS E FLUIDO DE PERFURAÇÃO

Neste capítulo são apresentados aspectos que envolvem o processo de separação entre sólidos e fluidos de perfuração desde a etapa de perfuração de um poço até a passagem da lama de perfuração através da peneira vibratória. Aqui são abordadas características de funcionamento e modelos que descrevem o processamento realizado por estes equipamentos. Ressalta-se que na presente literatura o fluido de perfuração é tratado como um plástico de Bingham.

### 2.1 Perfuração de Poços

A perfuração de poços de petróleo é realizada através de sondas de perfuração rotativa (Figura 2.1) compostas por variadas partes que contribuem para uma operação eficiente e segura. Os diversos componentes de uma sonda são divididos em “sistemas”, são eles (BOURGOYNE *et al.*, 1986; THOMAS *et al.*, 2001):

- *Sistema de sustentação e movimentação de cargas*: responsável por sustentar e permitir a descida/subida da coluna de perfuração, de revestimento e demais equipamentos;
- *Sistema de geração e transmissão de energia*: as sondas podem ser mecânicas ou diesel-elétricas de acordo com o modo de transmissão de energia para os equipamentos. Quando existe produção de gás em poços marítimos é economicamente viável utilizar-se turbinas a gás como fonte de geração de energia para as plataformas;
- *Sistema de rotação*: transmissão de rotação à coluna de perfuração e, conseqüentemente, à broca;

- *Sistema de circulação:* a principal função desse sistema é retirar cascalhos localizados no poço que são gerados pela perfuração. Parte deste sistema inclui o tratamento do fluido de perfuração com o controle de sólidos e ajuste de propriedades do fluido para recirculação;
- *Sistema de segurança:* é o sistema que permite o fechamento do poço no caso em que haja vazamento de fluidos provenientes da formação rochosa para o interior do poço;
- *Sistema de monitoração:* registro e controle dos parâmetros da perfuração para determinar problemas de forma mais rápida e também para fins de maximizar a eficiência do processo.

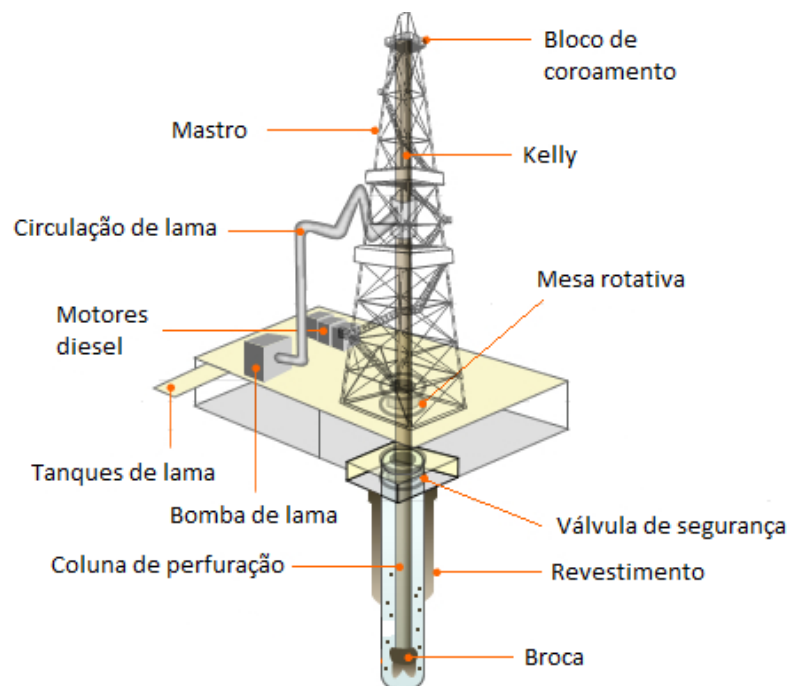


Figura 2.1 – Sonda de perfuração rotativa. Adaptado de: <http://www.galpennergia.com>. Acesso em: 18 de agosto de 2017.

Com o auxílio dos sistemas de rotação e suspensão a energia necessária para que ocorra a perfuração da formação rochosa é transmitida à broca, localizada na extremidade da coluna de perfuração. O fluido de perfuração é então injetado através do sistema de circulação e percorre a coluna chegando ao poço através da broca. Em seguida, como mostrado na Figura 2.2, o fluido retorna à superfície pelo espaço anular entre a coluna de perfuração e a parede do poço, retirando o cascalho resultante do processo de perfuração.

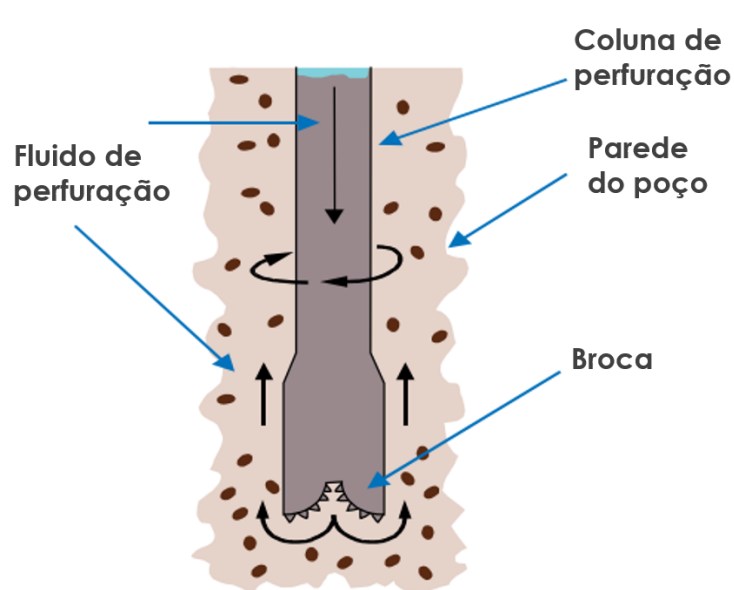


Figura 2.2 – Perfuração de uma formação rochosa. Adaptado de: International Association of Oil and Gas Producers (2003).

## 2.2 Fluidos de Perfuração

Um fluido é uma substância (líquida ou gasosa) que escoa quando uma tensão de cisalhamento é aplicada sobre ele (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2010). Quando essa tensão é nula o fluido está em repouso. Um fluido pode ser classificado como newtoniano ou não newtoniano, de acordo com a relação entre a tensão de cisalhamento e sua taxa de deformação. A Figura 2.3 apresenta o comportamento reológico dos diferentes tipos de fluidos.

Os fluidos newtonianos apresentam a tensão de cisalhamento diretamente proporcional à taxa de deformação. A constante de proporcionalidade é denominada viscosidade absoluta ( $\mu$ ). Em um fluido não newtoniano a tensão de cisalhamento não é diretamente proporcional à taxa de deformação e sua viscosidade aparente ( $\eta$ ) é dependente da sua taxa de deformação. Seu comportamento pode ser ou não ser dependente do tempo.



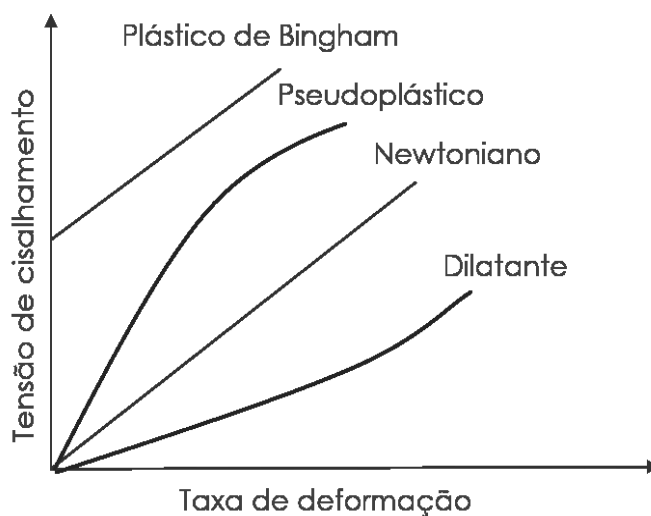


Figura 2.3 – Classificação de um fluido de acordo com seu comportamento reológico.

Nos casos em que um fluido se comporta de forma independente do tempo e sua viscosidade diminui com o aumento da taxa de deformação o fluido é denominado pseudoplástico. Ao contrário, quando a viscosidade aparente do fluido cresce junto com sua taxa de deformação ele é chamado dilatante.

Existe ainda um terceiro tipo, o plástico de Bingham, que se comporta como um sólido até que se atinja uma tensão limite, a partir da qual a tensão de cisalhamento possui uma relação linear com a taxa de deformação. São abrangidas por essa categoria substâncias como pastas dentais, lama de perfuração e suspensões de argila. (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2010).

Quando um fluido tem seu comportamento dependente do tempo ele pode ser denominado: tixotrópico, reopético e viscoelástico. Fluidos tixotrópicos são aqueles que quando submetidos a uma tensão de cisalhamento constante, a viscosidade aparente diminui com o tempo. Já em fluidos reopéticos o comportamento observado é o oposto, a viscosidade aparente aumenta ao longo do tempo. Fluidos viscoelásticos retornam parcialmente à sua forma original assim que a tensão atuante sobre ele é retirada.

### 2.2.1 Características de um Fluido de Perfuração

O fluido de perfuração é um componente essencial ao sistema de circulação e à operação de perfuração como um todo. A seleção de um fluido adequado influencia no custo

total e na avaliação da formação de um poço (DARLEY; GRAY, 1988). A AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (2005) cita diversas funções desempenhadas por um fluido de perfuração, dentre elas:

- Suspensão do cascalho formado no poço levando-o até a superfície;
- Controle de pressão na formação rochosa, garantindo a estabilidade do poço;
- Selamento de formações rochosas permeáveis e minimização de danos ao reservatório;
- Resfriamento, lubrificação e limpeza da broca, além de controle da corrosão do equipamento;
- Permite a avaliação adequada da formação rochosa e facilita as interpretações geológicas do material retirado do poço;
- Transmissão de energia hidráulica ao equipamento;
- Facilita o processo de completação e cimentação do poço.

Para que o fluido seja capaz de exercer tais funções de forma eficiente ele deve possuir algumas características (THOMAS *et al.*, 2001):

- Ser quimicamente estável;
- Ser facilmente separável do cascalho e mantê-lo em suspensão quando em repouso;
- Ser inerte em relação às formações rochosas perfuradas;
- Ser bombeável;
- Aceitar tratamentos químico e físico;
- Apresentar baixo grau de corrosão e abrasão;

- Ter custo compatível com a operação.

Para o controle da qualidade do fluido de perfuração suas propriedades devem ser monitoradas constantemente. Algumas das propriedades mais importantes são a densidade, os parâmetros reológicos como a viscosidade e a tensão limite de escoamento, a força gel, o pH, a salinidade, o teor de sólidos e de sólidos ativos (material argiloso que confere viscosidade ao fluido de perfuração).

### 2.2.2 Tipos e Composição do Fluido de Perfuração

Do ponto de vista químico um fluido de perfuração possui aspectos de suspensão, dispersão coloidal ou emulsão dependendo da sua composição. Quanto à sua classificação, o principal critério utilizado é o fluido base ou fase dispersante do fluido (THOMAS *et al.*, 2001). Em função disso os fluidos são classificados em fluidos de base aquosa, fluidos de base não aquosa e fluidos de base gasosa.

#### *Fluidos de Perfuração de Base Aquosa*

A água serve como meio dispersante de materiais coloidais como a argila e polímeros que controlam as propriedades do fluido de maneira a garantir que o mesmo tenha as características necessárias para uma perfuração eficiente. Também podem ser adicionados diversos produtos químicos como controladores de pH, dispersantes, redutores de filtrado, floculantes, surfactantes, bactericidas, anticorrosivos, dentre outros.

#### *Fluidos de Perfuração de Base Não Aquosa*

Devido a fatores ambientais e financeiros são menos utilizados que os de base aquosa. Sua fase dispersa é composta geralmente por gotículas de água ou alguns sólidos coloidais. Algumas de suas características incluem sua baixa taxa de corrosão e alto grau de lubrificação (CAENN; CHILLINGAR, 1996).

#### *Fluidos de Perfuração de Base Gasosa*

Fluidos desse tipo, por exemplo ar e gás nitrogênio, são utilizados em algumas situações especiais como em zonas que apresentam graves perdas de circulação, baixas pressões ou fragilidade nas rochas produtoras.

Uma vez que uma das funções do fluido de perfuração é retornar o cascalho retirado da formação rochosa à superfície, a lama resultante da perfuração (fluido e sólidos de perfuração) deve passar por uma etapa de tratamento e condicionamento na qual ocorrerá a separação entre sólidos e fluidos de forma a atender às exigências da legislação ambiental em relação ao descarte.

## 2.3 Sistema de Controle de Sólidos e Recuperação do Fluido de Perfuração

O fluido de perfuração contendo cascalho volta à superfície e permanece em tanques a partir dos quais é enviado ao Sistema de Controle de Sólidos (SCS). Nesse sistema, o fluido é tratado e condicionado de maneira a restabelecer suas características desejáveis e retornar ao poço para nova operação. Esse tratamento consiste em separar gases e sólidos incorporados ao fluido durante a perfuração e em adicionar aditivos para que o fluido retome suas propriedades iniciais (BUSSMEYER E HENKES, 2015).

A Figura 2.4 representa um exemplo de SCS composto por um conjunto de peneiras vibratórias, pelo *mud cleaner*, por uma centrífuga e um “secador” de cascalhos inserido no sistema quando é necessária a recuperação de um fluido de base oleosa (sintético). Ao retornar do poço, a lama de perfuração passa pelo conjunto de peneiras vibratórias cuja função é separar o fluido dos sólidos mais grosseiros. Estes seguem para o descarte de sólidos quando o fluido usado é de base aquosa. Do contrário, o cascalho passa por um secador para a remoção do fluido de perfuração aderido ao sólido.

Nos casos em que o fluido separado pelas peneiras esteja impregnado de gases provenientes da formação rochosa o mesmo passa por um desgaseificador. O fluido é levado para uma bateria de hidrociclones de 8” a 20” denominados desareiaadores que retiram a areia do fluido. Na sequência encontram-se os desiltadores que são hidrociclones menores (4” a 5”) responsáveis por remover o silte do fluido (THOMAS *et al.*, 2001). Nestes equipamentos de forma cônica, o fluido é submetido a forças centrífugas que o separam em uma parte sólida e

ainda com um pouco de líquido que sai pela parte inferior (*underflow*) e uma parte em que um líquido mais limpo e menos denso sai pela parte de cima (*overflow*) e segue para a próxima etapa de separação. A diferença entre estes hidrociclones reside no tamanho de seus cones, os desareiaadores devem ser colocados antes dos desiltadores que, por possuírem cones menores, removem sólidos mais finos. Quando o fluido usado é de base não aquosa, ou quando se deseja manter o agente adensante de fluidos de base aquosa, são inseridas peneiras vibratórias de malha bem fina para retirar resquícios do fluido contido no *underflow* dos desiltadores (essas unidades são chamadas de *mud cleaner*). O líquido separado nessas peneiras é alimentado novamente na lama que segue para a centrífuga que separa silte com partículas mais finas que os desiltadores. O fluido resgatado por este sistema e pelo secador de cascalhos é armazenado em tanques onde suas propriedades são reajustadas com a adição de produtos químicos e o mesmo é bombeado novamente no poço.

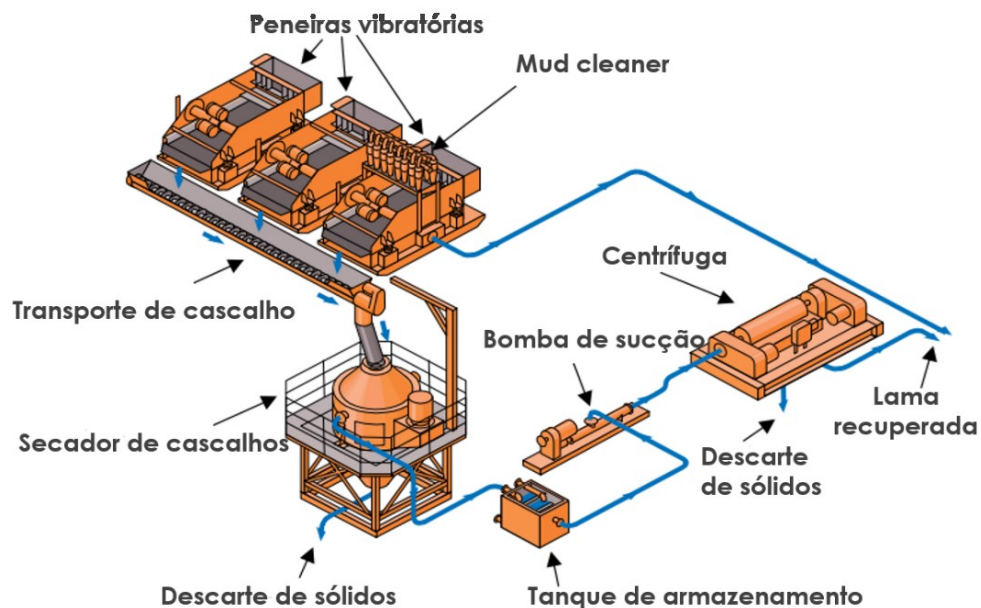


Figura 2.4 – Sistema de controle de sólidos. Adaptado de: International Association of Oil and Gas Producers (2003).

Além dos impactos ambientais derivados do descarte inadequado de fluido de perfuração junto ao cascalho retirados dos poços de petróleo devem ser levados em consideração outros fatores que tornam obrigatória a remoção de sólidos da lama de perfuração. Exemplos de problemas que podem ocorrer são o descontrole na pressão hidrostática devido à formação de torta na coluna de perfuração, entupimento da tubulação e a expulsão de fluido do

reservatório (*kick* e *blowout*). Problemas estes que acarretam em elevados custos com reparos de equipamentos, além do risco de incêndio devido à alta inflamabilidade do material retirado do poço.

Outro fator a ser levado em consideração é que a presença de sólidos na lama de perfuração faz com que sua viscosidade plástica aumente. Este cenário é indesejável uma vez que fluidos menos viscosos são melhores para a retirada de sólidos do poço (AMERICAN ASSOCIATION OF DRILLING ENGINEERS, 1999). Altas viscosidades plásticas também auxiliam no aumento da perda de carga no sistema de circulação diminuindo o desempenho dos equipamentos de perfuração.

Por serem os primeiros equipamentos a receber a lama de perfuração proveniente do poço as peneiras vibratórias são essenciais no SCS definindo a eficiência dos demais equipamentos. Por esse motivo a capacidade limite de processamento e sua eficiência de separação vem sendo objeto de alguns estudos nos últimos anos.

## 2.4 Peneiras Vibratórias

Peneiras vibratórias são dispositivos sobre os quais a lama de perfuração escoar através de uma tela, os sólidos da perfuração são transportados até o ponto de descarga e sólidos menores que a abertura dos poros atravessam a tela junto ao fluido de perfuração.

Segundo a AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (2005), em uma peneira parada a carga necessária para que haja escoamento do fluido através da tela é muito grande. O movimento vibratório transmitido à tela auxilia na passagem do fluido através da tela e no transporte dos sólidos maiores que a abertura da tela. Esta vibração usualmente se dá em duas direções: a parcela ascendente do movimento vibratório faz com que o fluido atravesse a tela enquanto o movimento descendente impulsiona os sólidos para a frente até o ponto de descarga da tela. O padrão de vibração de uma tela pode ser o de um movimento elíptico, circular ou linear sendo que este último apresenta vantagem em relação aos demais por possibilitar o transporte de sólidos para fora da piscina de fluido formada no início da tela.

Pode-se listar duas vantagens da formação de piscina de fluido no início da tela. A primeira delas é o acréscimo de carga sobre o fluido que auxilia na sua passagem através da

tela. A segunda vantagem reside no aumento da resistência do fluido em ser transportado ao longo da tela, fator que aumenta significativamente a capacidade de processamento de uma peneira (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2005). Esta capacidade também pode ser afetada pelas características reológicas do fluido usado, quantidade e tipo dos sólidos, taxa de perfuração.

Na Figura 2.5 encontra-se a representação de uma peneira vibratória usual composta por um tanque em que se armazena o fluido que é alimentado por transbordamento e distribuído pela superfície de peneiramento. As telas são encaixadas em uma cesta através da qual a vibração é repassada à tela. A lama de perfuração alimentada se distribui pela superfície de peneiramento (tela) presa a uma cesta que vibra com os membros de isolamento seguros por um suporte. O fluido passante (*underflow*) segue no sistema de controle e os sólidos retidos (*overflow*) são coletados por uma bandeja para o descarte ou, quando o fluido é de base não-aquosa, para o secador de cascalhos.

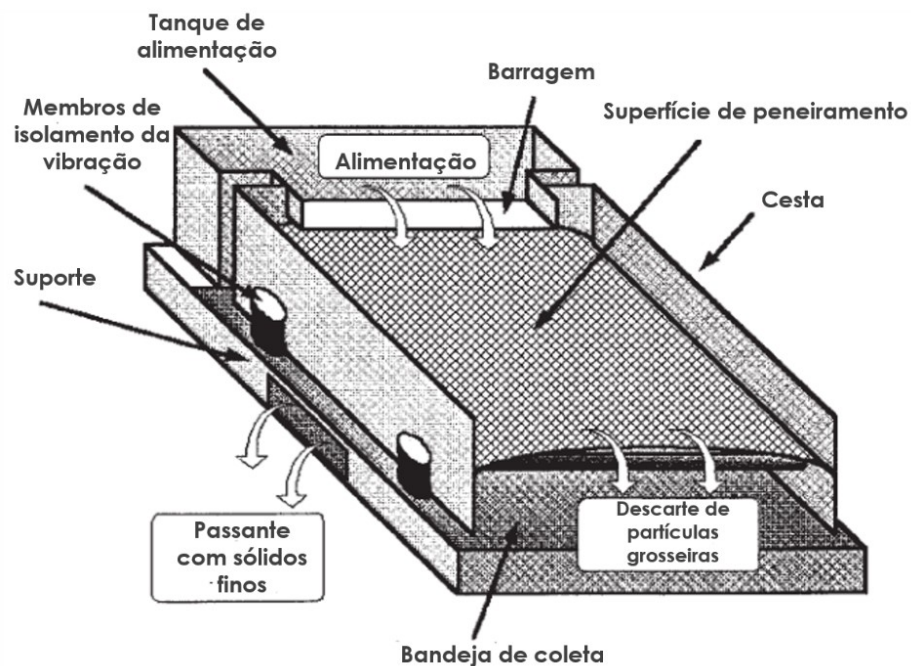


Figura 2.5 – Peneira vibratória. Adaptado de: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (2005).

Quando grandes quantidades de fluido começam a chegar à descarga na bandeja de coleta a peneira vibratória atingiu sua capacidade máxima, que é determinada pelos limites de fluido (vazão máxima de fluido que a peneira consegue processar) e de sólidos (quantidade

máxima de sólidos que pode ser transportada para fora da peneira). Ainda de acordo com a AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (2005), a capacidade de processamento da peneira diminui com fluidos mais viscosos (maior resistência da tela à passagem de fluido) e aumenta com o processamento de fluidos mais densos (maior pressão do fluido sobre a superfície da tela).

A capacidade de processamento de peneiras vibratórias é definida como a vazão máxima de fluido alimentado à peneira quando não há presença de sólidos sobre a tela. Depende de características operacionais da peneira (força-g, frequência de vibração, tipo de movimento vibratório e ângulo de inclinação da peneira), tipos de telas usadas e propriedades reológicas do fluido de perfuração.

Os movimentos vibratórios podem ser dos tipos elíptico não balanceado, circular, linear e elíptico balanceado. O movimento elíptico não balanceado (Figura 2.6) ocorre quando um vibrador rotativo é localizado acima do centro de gravidade da peneira fazendo com que o movimento do cesto seja circular logo abaixo do vibrador e elíptico nas pontas. O transporte de sólidos é altamente impactado pelo movimento do maior eixo das elipses formadas na alimentação e no ponto de descarga da tela. A situação desejável é que ambos os eixos sejam direcionados à descarga, porém a elipse formada no final da tela é orientada em direção à alimentação dificultando a saída de sólidos. Medidas podem ser tomadas para minimizar o problema de transporte como realocar o vibrador para o final da tela ou inclinar o *deck* na direção descendente. Porém essas medidas podem reduzir a vida útil da tela e a capacidade de processamento da peneira além de reduzir o tempo de residência da lama sobre a tela.

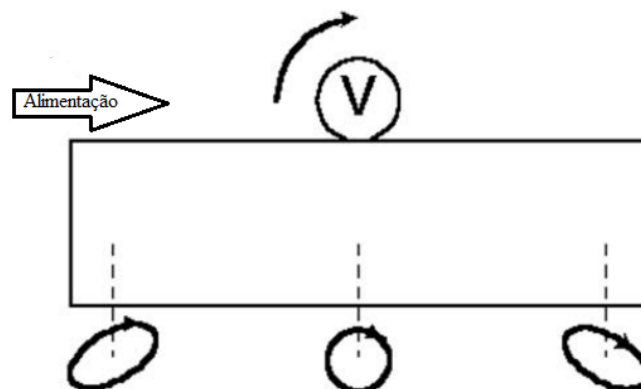


Figura 2.6 – Movimento elíptico não balanceado. Adaptado de: ASME (2005).



O segundo tipo de movimento vibratório é obtido por um único vibrador posicionado no centro de massa de uma cesta horizontal. O motor aciona um eixo concêntrico equipado com contrapesos que proporcionam movimento puramente circular (Figura 2.7) ao longo de todo o *deck*. Comparado ao movimento elíptico não balanceado o movimento circular melhora o transporte de sólidos reduzindo a perda de fluido durante o processo.

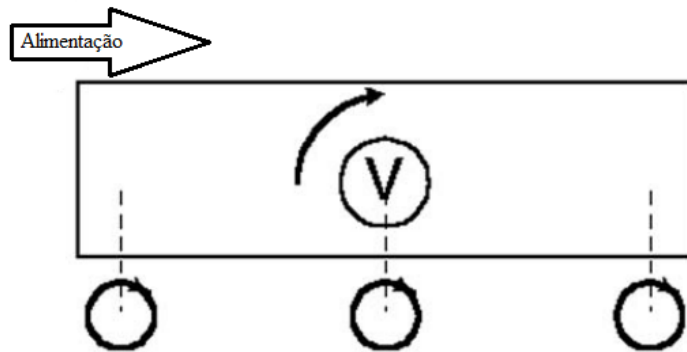


Figura 2.7 – Movimento vibratório circular. Adaptado de ASME (2005).

Quando um par de vibradores de mesma massa são posicionados em paralelo e com rotações contrárias o movimento resultante é linear. Esse tipo de movimento permite que o *deck* seja inclinado na direção ascendente criando uma piscina de fluido no início da tela. Peneiras com movimento vibratório linear (Figura 2.8) possuem maior potencial de transporte de sólidos e capacidade de processamento de fluidos do que aquelas com movimento elíptico não balanceado e circular com telas mais finas. A exceção é quando o sólido a ser transportado contém grandes quantidades de argila esmectita (um tipo de argila que quando molhada possui grande adesão em superfícies como as das peneiras). Nesse caso a tela deve ser inclinada na direção descendente para que o sólido seja transportado de maneira eficiente para o ponto de descarga da tela.

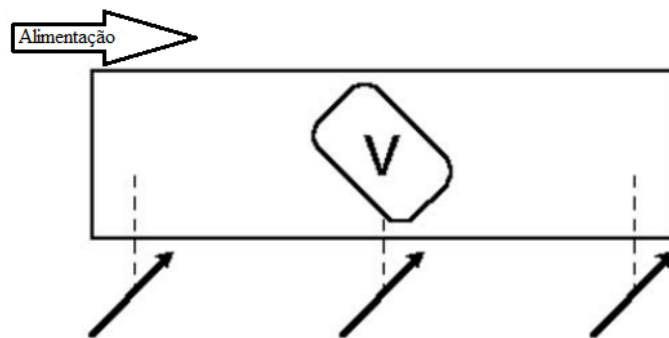


Figura 2.8 – Movimento vibratório linear. Adaptado de: ASME (2005).

O movimento elíptico balanceado (Figura 2.9) pode ser obtido pela colocação de dois vibradores com rotações contrárias de diferentes massas em paralelo ou vibradores também com rotações contrárias, porém com uma determinada angulação entre si. A relação entre o eixo maior e menor da elipse formada é controlada pelas diferentes massas nos vibradores paralelos ou pelo ângulo entre eles. Esse tipo de movimento permite que todos os eixos maiores das elipses apontem para o ponto de descarga da tela. Maiores ângulos entre os vibradores favorecem elipses maiores e conseqüentemente diminuem o transporte de sólidos e aumentam a vida útil das telas.

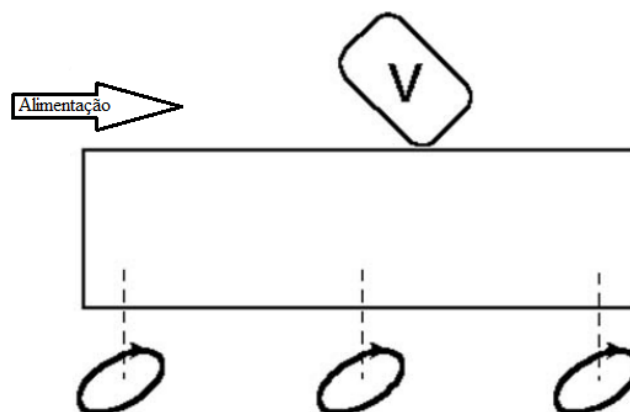


Figura 2.9 – Movimento elíptico balanceado. Adaptado de: ASME (2005).

## 2.5 Telas (Superfície de Peneiramento)

O tamanho e o formato das aberturas das telas exercem grande influência na remoção de sólidos por uma peneira vibratória e por isso seu desempenho é amplamente controlado pela escolha da tela a ser utilizada no processo. A tecnologia do desenvolvimento do tecido e painéis

de telas evoluiu de maneira que as telas atualmente usadas possuem complexos padrões de abertura.

A terminologia comum para a designação de telas é baseada na contagem do número de fios existente em cada direção por polegada (contagem em *mesh*). As telas mais comuns são as quadradas e retangulares (Figura 2.10) com fios trançados de maneira simples um por cima do outro. A separação feita por uma tela é amplamente influenciada pelo seu diâmetro de abertura que é determinado em conjunto pelo *mesh* e pelo diâmetro do fio do qual a tela é feita conforme dado pela Equação 2.1.

$$D = 25400 \left( \frac{1}{n} - d_f \right) \quad (2.1)$$

Em que  $D$  é o diâmetro efetivo de abertura da tela (micrometros),  $n$  é a contagem (mesh) e  $d_f$  o diâmetro do fio (polegadas).

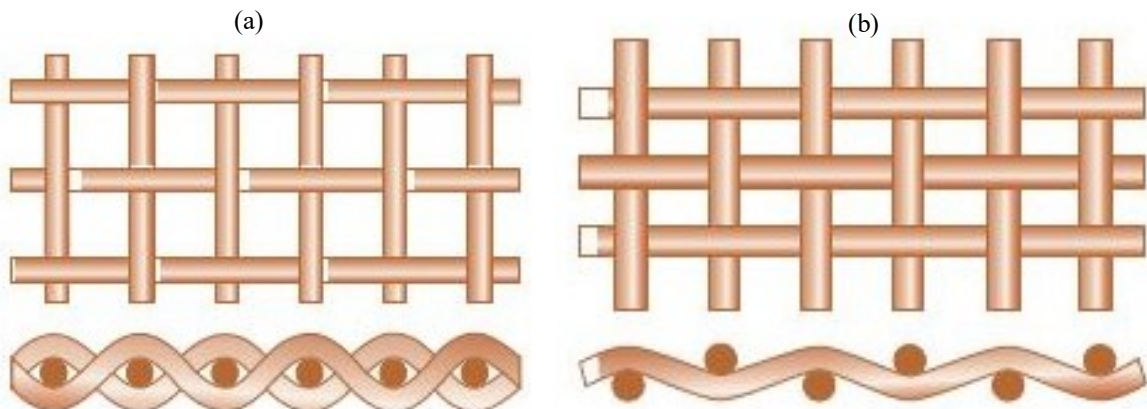


Figura 2.10 – Telas (a) quadrada e (b) retangular simples. Disponível em: <http://www.wirecloth.com/common-weave-styles/>. Acesso em: 25 de junho de 2017.

Telas em camadas passaram a ser usadas na indústria por possibilitarem a maior capacidade de processamento de fluido e por aumentarem a resistência ao bloqueio dos poros da tela. Esse tipo de tela é composto pela sobreposição de dois ou mais “mantos” que proporcionam variados tamanhos e formatos de abertura e, portanto, uma variedade de tamanhos de partículas atravessa a tela. Com o desenvolvimento de diferentes tecnologias e tipos surgiu a necessidade de padronizar a denominação para quantificar e comparar o desempenho das variadas telas. Um sistema de designação foi criado pelo *American Petroleum Institute* (API) de forma a comparar telas com o tamanho equivalente de abertura de telas *mesh*

quadradas. Segundo esse sistema uma etiqueta com as seguintes informações deve vir anexada aos painéis das telas: denominação do fabricante, número API, condutância da tela e área total desbloqueada. Os números API são atribuídos com as separações D100 em micrometros (Tabela 2.1). A denominação D100 significa que 100% das partículas de determinado tamanho são retidas pela tela.

Tabela 2.1- Designação API. Adaptado de: ASME (2005).

<b>Separação D100 (micrometros)</b>	<b>Número API</b>
> 3075 a 3675	API 6
> 2580 a 3075	API 7
> 2180 a 2580	API 8
> 1850 a 2180	API 10
> 1550 a 1850	API 12
> 1290 a 1550	API 14
> 1090 a 1290	API 16
> 925 a 1090	API 18
> 780 a 925	API 20
> 655 a 780	API 25
> 550 a 655	API 30
> 462,5 a 550	API 35
> 390 a 425	API 40
> 327,5 a 390	API 45
> 275 a 327,5	API 50
> 231 a 275	API 60
> 196 a 231	API 70
> 165 a 196	API 80
> 137,5 a 165	API 100
> 116,5 a 137,5	API 120
> 98 a 116,5	API 140
> 82,5 a 98	API 170
> 69 a 82,5	API 200
> 58 a 69	API 230
> 49 a 58	API 270
> 41,5 a 49	API 325
> 35 a 41,5	API 400
> 28,5 a 35	API 450
> 22,5 a 28,5	API 500

## 2.6 Análise de Modelos de Peneiramento Vibratório

HOBEROCK (1980) pode ser considerado um dos pioneiros em desenvolver um modelo matemático do peneiramento vibratório de fluidos de perfuração. Seu modelo descreve fenômenos mecânicos e de escoamento envolvidos no processo e avalia isoladamente parâmetros operacionais e características do fluido. A abordagem usada pelo autor para estudar o escoamento através da tela já havia sido aplicada em trabalhos anteriores (ARMOUR E CANNON, 1968; LORENZI, 1975) e consiste em considerar a tela como um fino leito empacotado ou meio poroso. Para fins de desenvolvimento do modelo foi considerado que o escoamento é unidimensional sem efeitos de contracorrente, a distribuição de velocidade através do canal é constante e uniforme, a pressão do fluido sobre a tela é hidrostática uma vez que o escoamento ocorre na direção paralela à tela e a inclinação da mesma é relativamente pequena de modo que seu efeito sobre a queda de pressão é desprezível.

Um aparato experimental foi montado com o objetivo de avaliar como a capacidade da peneira vibratória era afetada pela amplitude, frequência e localização do vibrador, inclinação da tela em relação à horizontal, tamanho, tipo e área da tela, altura da calha em relação à tela e propriedades do fluido de perfuração. O experimento descrito pelo autor foi realizado em uma peneira com área de superfície livre de 0,418 m<sup>2</sup>, vibrador hidráulico com capacidade de variar a força  $g$  de 0 a 15, tela com inclinação descendente variando em uma faixa de 0 a 30° e altura da calha na faixa de 5,08 a 38,1 cm. O fluido à base de água e bentonita foi misturado à areia e alimentado na peneira através de uma bomba centrífuga. Este fluido foi considerado pelo autor como um plástico de Bingham, hipótese essa adotada também por outros autores na literatura relativa ao fluido de perfuração (CHASE E DACHAVIJIT, 2005; RAJA *et al.*, 2011; RAJA, 2012).

Foram realizadas análises do escoamento de fluido puro (sem sólidos de perfuração) através da tela e, em seguida, estudou-se o transporte de partículas em uma superfície vibratória e o efeito sobre a capacidade de processamento causado pelo uso de partículas maiores do que o diâmetro de abertura da tela.

Os resultados obtidos pelo modelo mostraram boa concordância com as observações e os dados coletados experimentalmente. O autor concluiu que os vibradores podem ser

alocados de modo a proporcionar melhor transporte das partículas sem a necessidade de inclinar a tela na direção descendente. A partir disso foi observado que telas planas (não inclinadas) proporcionam maior capacidade de processamento de fluido e sólidos mais secos do que telas com inclinação descendente. Outros fatores que aumentam essa capacidade são as menores frequências de vibração e aumento da componente da aceleração normal à superfície da tela. Além disso o autor ressalta que a capacidade da peneira depende também da reologia do fluido (o aumento da viscosidade plástica diminui a capacidade de processamento de um fluido) e da quantidade de partículas de tamanho maior no fluido já que a presença de partículas grandes de sólidos pode causar bloqueio das aberturas e, portanto, diminuição da área efetiva de separação. HOBEROCK (1980) define também que a capacidade limite de processamento de uma peneira é aquela alcançada pelo comprimento final de fluido sobre a tela sem a presença de sólidos e, portanto, um mesmo fluido contendo sólidos de perfuração diminuirá a capacidade da peneira. A velocidade com a qual o fluido atravessa a tela é obtida através de uma correlação para a queda de pressão obtida com base na expressão desenvolvida por ARMOUR E CANNON (1968) considerando o escoamento dividido em duas regiões: laminar e turbulenta.

Posteriormente, HOBEROCK (1982a; 1982b; 1982c) publicou mais resultados experimentais mostrando que alguns parâmetros do fluido afetam mais a capacidade de processamento da peneira que outros. Por exemplo, o efeito da tensão limite de escoamento do fluido foi considerado muito pequeno enquanto a capacidade se mostrou mais sensível a alterações na viscosidade plástica (o uso de fluidos com baixa viscosidade causou o aumento da capacidade). HOBEROCK (1982c) avaliou também os efeitos que a inclinação ascendente da tela (1°, 2° e 4°) teria sobre a capacidade de processamento. Observou-se que o transporte de sólidos se tornou mais difícil e estabeleceu-se um limite da inclinação para que esse transporte aconteça na prática de 5°. Além disso, a significativa melhora na capacidade foi atribuída à formação de piscina no início da tela devido à inclinação.

O modelo proposto por ZHU *et al.* (2012) se baseou na segunda lei de Newton e na lei de conservação de massa para descrever o peneiramento do fluido de perfuração em uma peneira vibratória. O estudo da passagem de fluido, tratado como um plástico de Bingham, foi dividido em duas partes: a que considera o escoamento ao longo da tela e a que considera a passagem de fluido através da tela. Os autores aplicaram o teorema da equipartição de energia, em que os valores médios das variáveis de escoamento foram considerados de forma que o

modelo se tornou uma função somente da distância percorrida pelo fluido sobre a tela. Utilizou-se o método de diferenças finitas para resolução das equações e através de simulações foi possível obter a capacidade da peneira. Os experimentos de validação do modelo foram conduzidos em uma peneira quadrada simples de *mesh 100x100* para o processamento de um fluido de perfuração de base aquosa sem a presença de sólidos e, de acordo com o autor, estão descritos em ZHU (2005). ZHU *et al.* (2012) também define a capacidade de processamento da peneira de acordo com o comprimento final que o fluido alcança sobre a tela. Os resultados obtidos pelo modelo mostraram baixo erro em relação aos dados coletados experimentalmente.

A lama de perfuração retorna do poço com cascalhos provenientes da perfuração das formações rochosas, por isso é importante realizar o estudo do transporte desses sólidos e seu comportamento sobre a tela. HOBEROCK (1988) analisou a dinâmica do transporte de sólidos sobre a tela de uma peneira vibratória na região após o comprimento final de fluido. RAJA *et al.* (2011) consideraram que a tela de uma peneira é dividida em três seções (Figura 2.11): região de formação de torta, região de drenagem e região de transporte de sólidos.

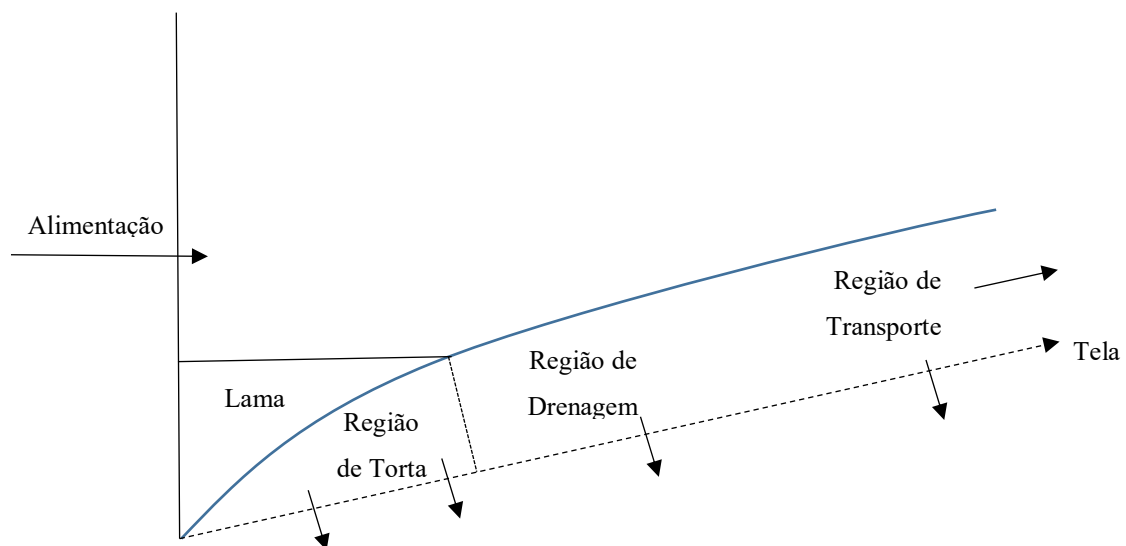


Figura 2.11 – Regiões de separação sólido-líquido sobre a tela de uma peneira vibratória. Adaptado de: RAJA *et al.* (2011).

Segundo os autores, partículas maiores que a abertura do poro da tela formam uma torta sobre a superfície de peneiramento que se move devido à vibração da tela. Conforme a torta se movimenta e mais sólidos vão se acumulando a superfície da torta alcança a superfície

lama/ar e a partir deste ponto é definida o início da região de drenagem cuja representação é avaliada neste trabalho. Na Figura 2.12 pode-se notar como se separam as regiões da peneira e se forma a região de drenagem na prática.

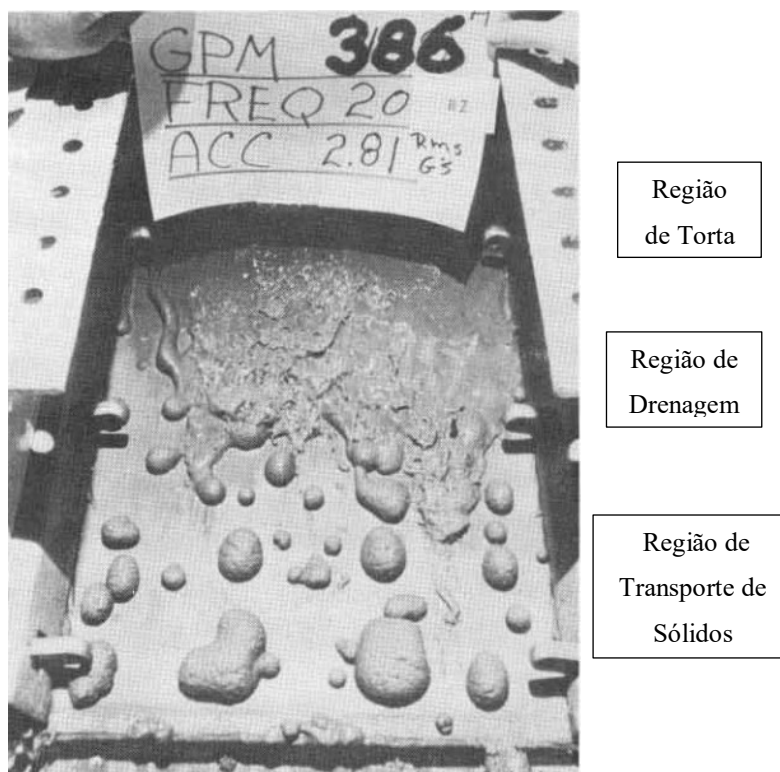


Figura 2.12 – Regiões de separação em uma peneira com inclinação descendente. Fonte: Hoberock (1980).

CUTT (1991) utilizou um sistema de análise de imagens para caracterizar a potencial eficiência de separação de telas com base somente em seus parâmetros (sem considerar as características do fluido) e que pode ser útil para a seleção preliminar destas telas. Testes de seleção de equipamentos conduzidos por AASE *et al.* (2013) mostraram que fluidos de base não aquosa contribuem para a maior capacidade de processamento de telas do que fluidos de base aquosa quando mantidas as mesmas condições de operação. Os testes foram realizados com fluido de base oleosa utilizado em campo e fluido de base aquosa preparado para cada peneira e a eles foi adicionada areia padronizada para simular os sólidos de perfuração. SCOTT (2006) propôs um sistema de controle automatizado para peneiras que contribui para garantir o aumento da vida útil da tela reduzindo a intervenção do operador e os custos operacionais. O sistema realiza variações na inclinação da tela e na força-g de acordo com a variação de alimentação a ser processada pela peneira.



São escassos os estudos envolvendo a modelagem do processo de separação entre sólidos e fluido de perfuração. Devido à importância do sistema de separação e, principalmente, das peneiras vibratórias na operação de perfuração de poços é necessário o desenvolvimento de estudos acerca da eficiência de separação e capacidade de processamento desse equipamento, objeto do estudo apresentado nesta dissertação.

# CAPÍTULO 3

## MODELAGEM MATEMÁTICA DO ESCOAMENTO DE UM FLUIDO SOBRE UMA TELA

O modelo desenvolvido neste estudo é uma representação matemática dos fenômenos físicos que ocorrem na região de drenagem durante o peneiramento vibratório de um fluido de perfuração sem a presença de sólidos de perfuração. A Figura 3.1 apresenta o volume de controle diferencial sobre o qual atuam as forças de superfície devidas à pressão ( $\vec{P}_x$  e  $\vec{P}_y$ ) atuante sobre o sistema, a força devido ao atrito entre o fluido e a tela ( $\vec{F}_{at}$ ), a força normal de reação da tela ao escoamento do fluido ( $\vec{F}_N$ ) e a força peso devido à aceleração da gravidade ( $\vec{F}_P$ ).

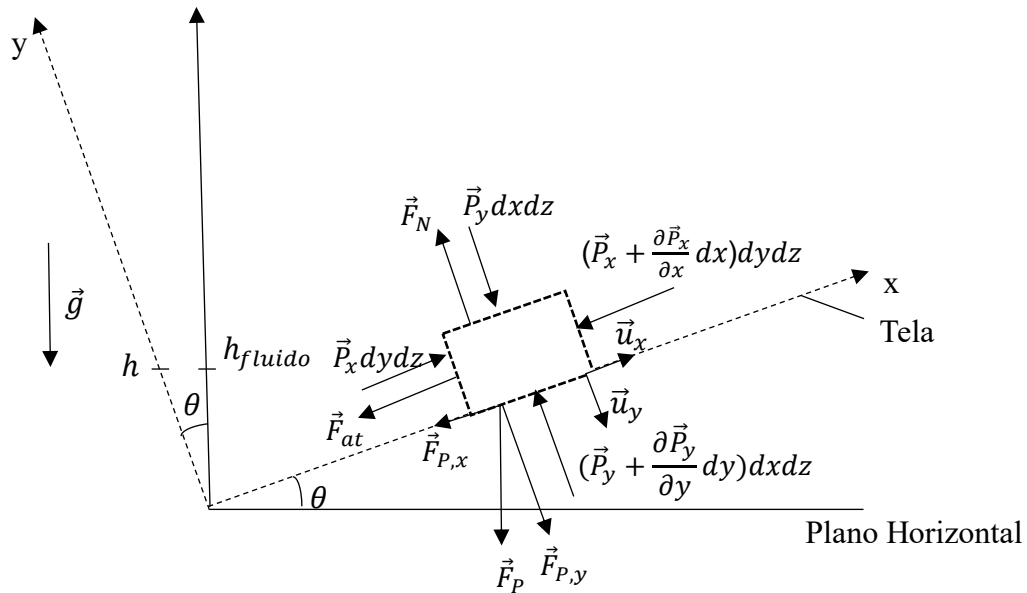


Figura 3.1 – Representação das forças de superfície atuando sobre o volume de controle diferencial.

Nas próximas seções é apresentada a análise do volume de controle delimitado a partir da aplicação da segunda lei de Newton considerando-se as forças externas agindo sobre o

volume de controle e o princípio de conservação da massa. Observa-se as seguintes considerações:

- i. A tela encontra-se inclinada na direção ascendente por um ângulo  $\theta$  em relação ao plano horizontal;
- ii. O escoamento do fluido sobre a tela é bidimensional ocorrendo nas direções paralela (direção x) e perpendicular (direção y) à tela;
- iii. O fluido de perfuração é um plástico de Bingham com propriedades reológicas constantes;
- iv. O escoamento paralelo à tela ocorre em regime turbulento;
- v. O sistema encontra-se em regime permanente.

### 3.1 Aplicação da segunda lei de Newton ao volume de controle diferencial

A segunda lei de Newton ou Princípio Fundamental da Dinâmica enuncia que a resultante das forças aplicadas sobre um corpo é proporcional à variação da quantidade de movimento realizada ao longo de um determinado período, tornando-o acelerado. Nas subseções seguintes são apresentados os desenvolvimentos para as direções x e y do escoamento.

#### 3.1.1 Balanço das componentes das forças paralelas à tela (direção x)

Definido o volume de controle diferencial de massa  $dm$ , as forças atuantes nesta direção são a componente da força de pressão  $P_x(x, y, z, t)$ , a força de atrito entre o fluido e a superfície da tela  $F_{at}$  e a componente da força peso  $F_{P,x}$ . Considerando que a aceleração total do volume de controle nesta direção é resultante da adição da componente da aceleração da tela ( $a_x$ ) com a componente da aceleração do fluido ( $\frac{dv_x}{dt}$ ), a aplicação da segunda lei de Newton no escoamento paralelo à tela resulta em:

$$P_x dydz - \left( P_x + \frac{\partial P_x}{\partial x} dx \right) dydz - F_{at} - F_{P,x} = dm \left( a_x + \frac{dv_x}{dt} \right) \quad (3.1)$$

Em que  $v_x(x, y, z, t)$  é a componente x da velocidade do fluido e a pressão no escoamento do fluido é hidrostática e igual a Equação 3.2:

$$P_x = \rho g h_{fluido} \quad (3.2)$$

Sendo  $\rho$  a densidade do fluido,  $g$  a aceleração da gravidade e  $h_{fluido}$  a altura da coluna de fluido sobre a tela. Essa altura é projetada sobre o eixo y e corrigida uma vez que se faz necessário contabilizar o deslocamento da tela em relação à horizontal. Assim:

$$h_{fluido} = h \cos \theta \quad (3.3)$$

Em que  $h$  é a altura no eixo y. Substitui-se a Equação 3.3 na Equação 3.2 derivando-a em relação a x, resultando em:

$$\frac{\partial P_x}{\partial x} dx = \rho g \cos \theta \frac{\partial h}{\partial x} dx \quad (3.4)$$

O terceiro termo do lado esquerdo da Equação 3.1 representa a resistência que a tela oferece ao escoamento do fluido na forma de uma força de atrito:

$$F_{at} = f F_N \quad (3.5)$$

Em que  $f$  é o fator de atrito do escoamento na direção x e  $F_N$  é a força de reação da tela normal à sua superfície. Utilizando-se o fator de atrito de Blasius (KIIJÄRVI, 2011) para escoamento turbulento na direção x adaptado para meio poroso representado pela Equação 3.6:

$$f = \frac{0,316}{Re_x^{0,25}} \quad (3.6)$$

O número de Reynolds  $Re_x$  foi definido conforme a Equação 3.7 para o escoamento paralelo à tela (direção x):

$$Re_x = \frac{\rho Z v_x}{\mu_0} \quad (3.7)$$

Em que  $Z$  é a largura da tela e  $\mu_0$  é a viscosidade plástica do fluido. O termo referente à força normal ( $F_N$ ) presente na Equação 3.5 foi obtido estabelecendo-se uma condição para que ocorra o escoamento do fluido através da tela em que  $F_N < |F_{p,y}|$ . Admite-se então que há uma relação entre a força normal de reação da tela ao escoamento ( $F_N$ ) e a componente y da força peso exercida pelo fluido sobre a tela ( $F_{p,y}$ ) definida pela Equação 3.8 cuja constante de proporcionalidade é denominada coeficiente de escoamento ( $\eta$ ) para a passagem de fluido através da tela.

$$\eta = \frac{F_N}{|F_{p,y}|} \quad (3.8)$$

O escoamento através da tela ocorre quando  $0 \leq \eta < 1$ , ou seja, nos casos em que a força normal ( $F_N$ ) é nula ou possui magnitude inferior em relação à força peso ( $F_{p,y}$ ). Nas situações em que  $\eta \geq 1$  não há escoamento no sistema. Logo:

$$F_{at} = f\eta|F_{p,y}| \quad (3.9)$$

As componentes x e y da força peso são obtidas, respectivamente, por:

$$F_{p,x} = dmgsen\theta \quad (3.10)$$

$$F_{p,y} = dmgsen\theta \quad (3.11)$$

Substituindo a Equação 3.11 na Equação 3.9:

$$F_{at} = f\eta dmgsen\theta \quad (3.12)$$

A componente x da aceleração do fluido é expressa por:

$$\frac{dv_x}{dt} = \frac{\partial v_x}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \frac{dz}{dt} + \frac{\partial v_x}{\partial t} \frac{dt}{dt} \quad (3.13)$$

Devido à turbulência do escoamento na direção x, a variação da componente x da velocidade do fluido ( $v_x$ ) na direção y é considerada desprezível. As considerações de escoamento bidimensional e regime permanente são aplicadas à Equação 3.13:

$$\frac{dv_x}{dt} = \frac{\partial v_x}{\partial x} v_x \quad (3.14)$$

Após as devidas substituições a Equação 3.1 torna-se:

$$-\rho g \cos\theta \frac{\partial h}{\partial x} dx dy dz - f \eta dm g \cos\theta - dm g \sin\theta = dm \left( a_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} v_x \right) \quad (3.15)$$

Dividindo a Equação 3.15 pelo volume  $dV = dx dy dz$  do elemento de controle e sabendo que a densidade do fluido é definida por  $\rho = dm/dV$ :

$$-\rho g \cos\theta \frac{\partial h}{\partial x} - f \eta \rho g \cos\theta - \rho g \sin\theta = \rho \left( a_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} v_x \right) \quad (3.16)$$

A divisão da Equação 3.16 por  $\rho g$  resulta na Equação 3.17 para a segunda lei de Newton na direção x:

$$\cos\theta \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{v_x}{g} \frac{\partial v_x}{\partial x} = - \left( \frac{a_x}{g} + f \eta \cos\theta + \sin\theta \right) \quad (3.17)$$

### 3.1.2 Balanço das componentes das forças perpendiculares à tela (direção y)

Considerando que na direção y atuam as componentes da força de pressão ( $P_y$ ), da força peso ( $F_{p,y}$ ) e a força normal ( $F_N$ ). O balanço das forças de campo e superfície resulta em:

$$\left( P_y + \frac{\partial P_y}{\partial y} dy \right) dx dz - P_y dx dz + F_N - F_{p,y} = dm \left( a_y + \frac{dv_y}{dt} \right) \quad (3.18)$$

Em que  $a_y$  é a componente y da aceleração da tela e a componente da aceleração do fluido pode ser obtida pelo termo:

$$\frac{dv_y}{dt} = \frac{\partial v_y}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \frac{dz}{dt} + \frac{\partial v_y}{\partial t} \frac{dt}{dt} \quad (3.19)$$

De acordo com as considerações de escoamento bidimensional e regime permanente os termos  $\partial v_y / \partial z$  e  $\partial v_y / \partial t$  são nulos, logo:

$$\frac{dv_y}{dt} = \frac{\partial v_y}{\partial x} v_x + \frac{\partial v_y}{\partial y} v_y \quad (3.20)$$

Com os termos  $F_N$  e  $F_{P,y}$  previamente definidos pelas Equações 3.8 e 3.11, respectivamente, o balanço de forças apresentado na Equação 3.18 resulta em:

$$\frac{\partial P_y}{\partial y} dy dx dz + \eta dm g \cos \theta - dm g \cos \theta = dm \left( a_y + \frac{\partial v_y}{\partial x} v_x + \frac{\partial v_y}{\partial y} v_y \right) \quad (3.21)$$

Analogamente à direção x divide-se a Equação 3.21 pelo volume do elemento de controle  $dV = dx dy dz$  e sabendo que  $\rho = dm/dV$ :

$$\frac{\partial P_y}{\partial y} + \eta \rho g \cos \theta - \rho g \cos \theta = \rho \left( a_y + \frac{\partial v_y}{\partial x} v_x + \frac{\partial v_y}{\partial y} v_y \right) \quad (3.22)$$

Integrando a Equação 3.22 em y com  $0 \leq y \leq h$ :

$$\begin{aligned} \int_0^h \frac{\partial P_y}{\partial y} dy + \int_0^h \eta \rho g \cos \theta dy - \int_0^h \rho g \cos \theta dy \\ = \int_0^h \rho a_y dy + \int_0^h \rho \frac{\partial v_y}{\partial x} v_x dy + \int_0^h \rho \frac{\partial v_y}{\partial y} v_y dy \end{aligned} \quad (3.23)$$

Dividindo a Equação 3.23 por  $\rho g$  temos:

$$\frac{\Delta P_y|_0^h}{\rho g} + (\eta - 1) \cos \theta h = \frac{a_y}{g} h + \frac{1}{g} \int_0^h \frac{\partial v_y}{\partial x} v_x dy + \frac{1}{2g} v_y^2|_0^h \quad (3.24)$$

Devido à lentidão do escoamento através da tela existe a predominância de forças viscosas na direção  $y$ . Assim, a perda de carga devido às forças inerciais representada pelo segundo termo do lado direito da Equação 3.24 pode ser desprezada. Considerando também que no contorno  $y = 0$ , a componente  $y$  da velocidade possui um valor médio  $u_y$  ( $v_y|_0 = u_y$ ) e no contorno  $y = h$ , a componente possui valor nulo ( $v_y|_h = 0$ ) para todo o  $x$ .

$$\frac{\Delta P_y}{\rho g} + \frac{u_y^2}{2g} = \left[ \frac{a_y}{g} + (1 - \eta) \cos \theta \right] h \quad (3.25)$$

A análise da queda de pressão na direção  $y$  será apresentada na Seção 3.2.

### 3.1.3 Aplicação da lei da conservação da massa ao volume de controle

A lei da conservação da massa é representada pela equação da continuidade para o escoamento bidimensional com fluido incompressível dada por:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad (3.26)$$

Integrando a Equação 3.26 em relação a  $y$  com  $0 \leq y \leq h$ :

$$\int_0^h \frac{\partial v_x}{\partial x} dy = - \int_0^h \frac{\partial v_y}{\partial y} dy \quad (3.27)$$

Visto que a variação da componente da velocidade em  $x$  é desprezível devido à turbulência nesta direção a Equação 3.27 pode ser reescrita na forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} (v_x h) = u_y \quad (3.28)$$

Tem-se então a equação da continuidade para o fluido escoando através da tela:

$$h \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_x \frac{\partial h}{\partial x} = u_y \quad (3.29)$$



### 3.2 Proposta de uma correlação para a queda de pressão através de uma tela

São poucas as correlações existentes para o escoamento de fluidos não newtonianos em meios porosos. Nesta seção são apresentadas algumas destas correlações em que o fluido é considerado mais especificamente um plástico de Bingham e uma análise da queda de pressão através do meio para uma determinada faixa de velocidades é realizada.

#### *Correlação de Hoberock (1980)*

A correlação de HOBROCK (1980) para a queda de pressão foi desenvolvida com o intuito de simular o escoamento de fluidos de perfuração através de telas de peneiras vibratórias e surgiu da necessidade de representar esses sistemas de uma maneira apropriada visto que as correlações conhecidas até então não eram aplicáveis às telas de trama complexa e multicamadas que vinham sendo inseridas nos sistemas de processamento de lama nos campos de perfuração de poços. HOBROCK (1980) baseou-se na abordagem de LORENZI (1975) e ARMOUR e CANNON (1968) ao tratar a tela como um meio poroso ou leito empacotado muito fino. A correlação apresentada na Equação 3.30 possui em seu primeiro termo a representação dos efeitos viscosos do escoamento (região laminar), um segundo termo em que são contabilizados efeitos inerciais (região turbulenta) e um terceiro termo que leva em conta o comportamento não-newtoniano do fluido.

$$\Delta P_H = f_0 \alpha \frac{B a^2}{\varepsilon^2} \mu_0 u_y + f_0 \beta \frac{\rho B}{\varepsilon^2 D} u_y^2 + f_0 \gamma \frac{a}{\varepsilon} \tau_0 \quad (3.30)$$

Em que  $u_y$  é a velocidade do fluido através da tela,  $f_0$  é o fator de tortuosidade da tela (razão entre a distância real percorrida pelo fluido através da tela e a espessura da tela),  $B$  é a espessura da tela,  $a$  é a superfície específica da tela,  $\varepsilon$  é a porosidade da tela,  $D$  é o diâmetro de abertura dos poros da tela,  $\rho$  é a densidade do fluido,  $\mu_0$  é a viscosidade plástica do fluido,  $\tau_0$  é a tensão limite de escoamento e  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  são constantes adimensionais e empíricas determinadas por análise de regressão não linear.

### *Correlação de Hoberock (1982)*

Em 1982, HOBEROCK reapresentou sua correlação em termos da condutância da tela (capacidade de permitir a passagem de fluido) para a previsão da velocidade do fluido através da tela dada pela Equação 3.31:

$$\Delta P_H' = \frac{\mu_0}{c} u_y + \beta \frac{\rho B}{\varepsilon^2 D} u_y^2 + \frac{\gamma \sqrt{\alpha}}{\sqrt{cB}} \tau_0 \alpha \quad (3.31)$$

Em que  $c$  é a condutância da tela dada por:

$$c = \frac{\varepsilon^2}{\alpha a^2 B} \quad (3.32)$$

### *Correlação de Chase e Dachavijit (2005)*

A correlação foi desenvolvida ao introduzir as propriedades de um plástico de Bingham na equação de Ergun para fluidos newtonianos. A queda de pressão pode ser deduzida pela Equação 3.33:

$$\Delta P_{CD} = f \frac{3(1 - \varepsilon) B}{\varepsilon^3} \frac{\rho u_y^2}{D} \quad (3.33)$$

Em que o fator de atrito  $f$  é expresso pela Equação 3.34 em termos dos números adimensionais de Reynolds e de Hedstrom.

$$f = 5,741 Re^{-1,969} He^{0,958} + \frac{60}{Re} + 0,6 \quad (3.34)$$

O adimensional de Reynolds é definido pela Equação 3.35 e o número de Hedstrom pela Equação 3.36:

$$Re_c = \frac{\rho D u_y}{\mu_0 (1 - \varepsilon)} \quad (3.35)$$

e

$$He = \frac{\tau_0 \rho D^2}{\mu_0^2} \frac{\varepsilon^2}{(1 - \varepsilon)^2} \quad (3.36)$$

*Correlação de Zhu et al. (2012)*

ZHU *et al.* (2012) fornecem uma correlação para a perda de carga em um escoamento que pode ser expressa em termos de queda de pressão pela Equação 3.37.

$$\Delta P_z = \frac{\mu_0}{c} u_y + \beta \frac{\rho B}{\varepsilon^2 D} u_y^2 + c_0 \tau_0 \quad (3.37)$$

Em que  $\beta$  e  $c_0$  são constantes empíricas obtidas por análise de regressão.

No presente trabalho, o desenvolvimento de uma correlação para a queda de pressão seguiu a abordagem apresentada por ARMOUR E CANNON (1968) e HOBEROCK (1980) em que a tela é tratada como um meio poroso muito fino. Para tanto, análise do escoamento foi dividida em duas regiões: laminar e turbulenta.

### 3.2.1 Análise do escoamento na região laminar

O escoamento na região laminar é dominado pela resistência de forças viscosas. Considerando o leito formado por partículas esféricas, primeiramente é analisado o escoamento do fluido em torno de uma partícula esférica, a força de arrasto atuando sobre ela é dada por:

$$F = \frac{1}{2} C_a \rho A_{ef} v_y^2 \quad (3.38)$$

Em que  $C_a$  é o coeficiente de arrasto,  $\rho$  é a densidade do fluido,  $A_{ef}$  é a área da seção reta efetiva (perpendicular à velocidade) e  $v_y$  é a velocidade do fluido em torno da partícula na direção y. Definindo a área de seção reta efetiva como:

$$A_{ef} = \pi r^2 \quad (3.39)$$

Em que  $r$  é o raio da esfera. O coeficiente de arrasto para regime laminar é dado pela correlação:

$$C_a = \frac{24}{Re} \quad (3.40)$$

Os autores BRISCOE, LUCKHAM E REN (1993) fornecem uma expressão análoga ao número de Reynolds para plásticos de Bingham:

$$\frac{1}{Re} = \frac{\mu_0}{D\rho v_y} + \frac{7\pi\tau_0}{24\rho v_y^2} \quad (3.41)$$

Em que  $\mu_0$  é a viscosidade plástica do fluido,  $\tau_0$  é a tensão limite de escoamento e  $D$  é o diâmetro da partícula. Sabendo que  $D = 2r$ , a Equação 3.40 se torna:

$$C_a = \frac{12\mu_0}{r\rho v_y} + \frac{7\pi\tau_0}{\rho v_y^2} \quad (3.42)$$

Substituindo as Equações 3.39 e 3.42 em 3.38:

$$F = 6\pi r\mu_0 v_y + \frac{7}{2}\pi^2 r^2 \tau_0 \quad (3.43)$$

Uma vez que o leito com área da seção transversal unitária possui  $n_p$  partículas esféricas, definidas por:

$$n_p = \frac{V_{\text{sólidos leito}}}{V_{\text{esfera}}} = \frac{bLZ(1-\varepsilon)}{\frac{4}{3}\pi r^3} = \frac{3bLZ(1-\varepsilon)}{4\pi r^3} \quad (3.44)$$

Sendo que  $\varepsilon$  é a porosidade,  $b$  é a espessura,  $L$  é o comprimento e  $Z$  é a largura do leito. Logo, a força de arrasto total no leito é:

$$F_{\text{total}} = \frac{3bLZ(1-\varepsilon)}{4\pi r^3} \left( 6\pi r\mu_0 v_y + \frac{7}{2}\pi^2 r^2 \tau_0 \right) \quad (3.45)$$

Para considerar o efeito da interação entre partículas o grau de aproximação (I) é definido por um múltiplo do volume de sólidos (C):

$$I = C(1 - \varepsilon) \quad (3.46)$$

A velocidade intersticial percorrida pelo fluido através da tela é:

$$v_y = -\frac{u_y}{\varepsilon} \quad (3.47)$$

A força total de arrasto resultante através da tela é:

$$F_{total} = C(1 - \varepsilon) \frac{3bLZ(1 - \varepsilon)}{4\pi r^3} \left( -6\pi r \mu_0 \frac{u_y}{\varepsilon} + \frac{7}{2} \pi^2 r^2 \tau_0 \right) \quad (3.48)$$

Sabendo que a força produzida pelo fluido deve ser igual à força produzida pela queda de pressão através da tela, então:

$$\varepsilon LZ \Delta P_{viscosa} = C(1 - \varepsilon) \frac{3bLZ(1 - \varepsilon)}{4\pi r^3} \left( -6\pi r \mu_0 \frac{u_y}{\varepsilon} + \frac{7}{2} \pi^2 r^2 \tau_0 \right) \quad (3.49)$$

Inserindo uma relação entre a superfície específica da esfera e o raio  $r$ :

$$a = \frac{A_{esfera}}{V_{esfera}} (1 - \varepsilon) = \frac{4\pi r^2}{\frac{4}{3}\pi r^3} (1 - \varepsilon) = \frac{3(1 - \varepsilon)}{r} \quad (3.50)$$

Substituindo a Equação 3.50 na Equação 3.49:

$$\Delta P_{viscosa} = -\frac{C}{2} \frac{a^2}{\varepsilon^2} b \mu_0 u_y + \frac{7}{8} \pi C a \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} b \tau_0 \quad (3.51)$$

### 3.2.2 Análise do escoamento na região turbulenta

Se considerarmos que o escoamento turbulento em telas é equivalente ao escoamento em canais paralelos interligados de seção transversal variada, temos a seguinte relação para fator de atrito em dutos circulares de BIRD, STEWART E LIGHTFOOT (2004):

$$f = \frac{1}{4} \frac{D}{b} \frac{\Delta P_{inercial}}{\frac{1}{2} \rho v_y^2} \quad (3.52)$$

Com a substituição da velocidade real percorrida pelo fluido através da tela temos que queda de pressão inercial:

$$\Delta P_{inercial} = \frac{2fb\rho u_y^2}{D \varepsilon} \quad (3.53)$$

A queda de pressão total ao longo da tela é dada pela soma dos efeitos viscosos e inerciais:

$$\Delta P_{tela} = \frac{2fb\rho u_y^2}{D \varepsilon} - \frac{C}{2} \frac{a^2}{\varepsilon^2} b\mu_0 u_y + \frac{7}{8} \pi C a \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} b\tau_0 \quad (3.54)$$

Conforme mostrado por BRISCOE, LUCKHAM E REN (1993), o fator de atrito para escoamento turbulento é constante ( $f = 0,44$ ). Então, definindo  $\alpha = \frac{C}{2}$ ,  $\beta = 2f$  e  $\gamma = \frac{7}{8} \pi C$  como constantes empíricas:

$$\Delta P_{tela} = \beta \frac{b\rho u_y^2}{D \varepsilon} - \alpha \frac{a^2}{\varepsilon^2} b\mu_0 u_y + \gamma a \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} b\tau_0 \quad (3.55)$$

Em alguns tipos de telas mais complexas o caminho percorrido pelo fluido é maior que sua espessura. Portanto, a espessura é corrigida por um fator de tortuosidade ( $f_0$ ):

$$b = f_0 B \quad (3.56)$$

Tem-se a forma final da correlação para a queda de pressão revisitada de HOBROCK (1980):

$$\Delta P_{tela} = \beta \rho \frac{f_0 B}{D \varepsilon^2} u_y^2 - \alpha \frac{a^2}{\varepsilon^2} f_0 B \mu_0 u_y + \gamma a \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} f_0 B \tau_0 \quad (3.57)$$

Essa correlação difere daquela apresentada por HOBROCK (1980) e representada pela Equação 3.30 por inserir o termo equivalente à espessura da tela ocupada por sólidos  $B(1 - \varepsilon)$ . Dessa forma, considera-se que a parcela da queda de pressão atribuída à hipótese de o fluido ser um plástico de Bingham é distribuída entre as partículas constituintes do leito.

Propõe-se também uma correção no termo de queda de pressão inercial de forma análoga à metodologia proposta para o escoamento viscoso em torno de esferas. Assim, a força de atrito através de um tubo circular é dada por:

$$F_{tubo} = A_{tubo} K f \quad (3.58)$$

Sendo que  $A_{tubo}$  é a área superficial de um tubo circular e  $K$  é a energia cinética característica. Sabendo que (BIRD, STEWART E LIGHTFOOT, 2002):

$$A_{tubo} = 2\pi r b \quad (3.59)$$

e

$$K = \frac{1}{2} \rho v_y^2 \quad (3.60)$$

Logo,

$$F_{tubo} = 2\pi r b \frac{1}{2} \rho v_y^2 f \quad (3.61)$$

Se uma tela é composta por  $n_t$  tubos cilíndricos:

$$n_t = \frac{V_{leito}}{V_{tubo}} = \frac{bLZ(1-\varepsilon)}{\pi r^2 b} = \frac{LZ(1-\varepsilon)}{\pi r^2} \quad (3.62)$$

A força de atrito total por entre os tubos é:

$$F_{tt} = 2fCLZ\rho \frac{b}{D} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^2} u_y^2 \quad (3.63)$$

Com a constante empírica relativa ao escoamento inercial  $\beta = 2fC$ , a força de atrito produzida pelo fluido através dos tubos cilíndricos é equivalente à queda de pressão inercial através da tela:

$$\Delta P_{inercial} = \beta \rho \frac{f_0 B (1 - \varepsilon)^2}{D \varepsilon^3} u_y^2 \quad (3.64)$$

Resultando em uma correlação para a queda de pressão total através da tela:

$$\Delta P_{tela} = \beta \rho \frac{f_0 B (1 - \varepsilon)^2}{D \varepsilon^3} u_y^2 - \alpha \frac{a^2}{\varepsilon^2} f_0 B \mu_0 u_y + \gamma a \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} f_0 B \tau_0 \quad (3.65)$$

### 3.3 Metodologia de resolução do modelo proposto

O modelo para escoamento de fluido de perfuração em uma peneira vibratória é composto pelas Equações 3.17, 3.25 e 3.29:

$$\cos \theta \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{v_x}{g} \frac{\partial v_x}{\partial x} = - \left( \frac{a_x}{g} + f \eta \cos \theta + \sin \theta \right) \quad (3.17)$$

$$\frac{\Delta P_y}{\rho g} + \frac{u_y^2}{2g} = \left[ \frac{a_y}{g} + (1 - \eta) \cos \theta \right] h \quad (3.25)$$

$$h \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_x \frac{\partial h}{\partial x} = u_y \quad (3.29)$$

A avaliação da queda de pressão na direção y é realizada a partir da Figura 3.2.

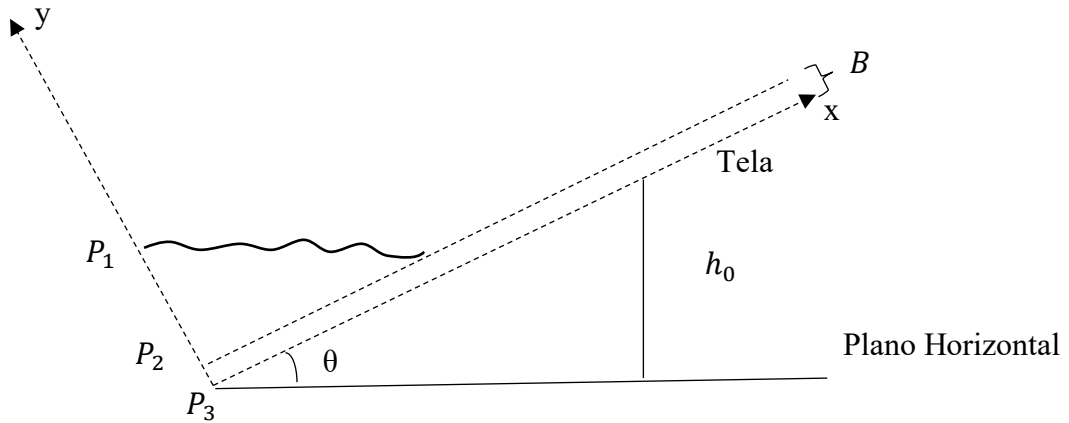


Figura 3.2 – Queda de pressão na direção y.

Na Figura 3.2 tem-se que a pressão  $P_1$  é a pressão atmosférica na superfície do fluido,  $P_2$  é a pressão exercida pela coluna de fluido sobre a superfície de peneiramento (tela) e  $P_3$  é a



pressão sob a tela de espessura  $B$  equivalente a pressão atmosférica ( $P_{atm}$ ). Portanto, a variação total de pressão na direção  $y$  do escoamento é avaliada pela Equação 3.66.

$$\Delta P_y = P_1 - P_3 = P_1 - P_2 + P_2 - P_3 \quad (3.66)$$

Devido à coluna de fluido a pressão  $P_2$  deve ser maior que a pressão atmosférica representada por  $P_1$ . Logo,

$$P_1 - P_2 = -\rho g h \cos \theta \quad (3.67)$$

A diferença de pressão entre os pontos  $P_2$  e  $P_3$  é dada pela Equação 3.68:

$$P_2 - P_3 = \Delta P_{tela} - \rho g \cos \theta B \quad (3.68)$$

Utilizando  $\Delta P_{tela}$  obtido na Equação 3.65:

$$\Delta P_y = \left( \beta \rho \frac{f_0 B (1 - \varepsilon)^2}{D \varepsilon^3} u_y^2 - \alpha \frac{a^2}{\varepsilon^2} f_0 B \mu_0 u_y + \gamma a \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} f_0 B \tau_0 \right) - \rho g \cos \theta (h + B) \quad (3.69)$$

Substituindo a Equação 3.69 na Equação 3.25 do modelo:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho g} \left( \beta \rho \frac{f_0 B (1 - \varepsilon)^2}{D \varepsilon^3} u_y^2 - \alpha \frac{a^2}{\varepsilon^2} f_0 B \mu_0 u_y + \gamma a \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} f_0 B \tau_0 \right) - \cos \theta (h + B) \\ + \frac{u_y^2}{2g} = \left[ \frac{a_y}{g} + (1 - \eta) \cos \theta \right] h \end{aligned} \quad (3.70)$$

Tem-se a Equação 3.71 caracterizando o escoamento na direção  $y$ :

$$\left[ \frac{1}{\rho g} \beta \rho \frac{f_0 B (1 - \varepsilon)^2}{D \varepsilon^3} + \frac{1}{2g} \right] u_y^2 - \frac{1}{\rho g} \alpha \frac{a^2}{\varepsilon^2} f_0 B \mu_0 u_y + \left[ (\eta - 1) \cos \theta - \frac{a_y}{g} \right] h + \frac{1}{\rho g} \gamma a \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} f_0 B \tau_0 - B \cos \theta = 0 \quad (3.71)$$

Assim, o modelo em sua forma final é representado pelo sistema algébrico-diferencial composto pelas Equações 3.17, 3.29 e 3.71:

$$\cos \theta \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{v_x}{g} \frac{\partial v_x}{\partial x} = - \left( \frac{a_x}{g} + f \eta \cos \theta + \sin \theta \right) \quad (3.17)$$

$$\left[ \frac{1}{\rho g} \beta \rho \frac{f_0 B (1 - \varepsilon)^2}{D \varepsilon^3} + \frac{1}{2g} \right] u_y^2 - \frac{1}{\rho g} \alpha \frac{a^2}{\varepsilon^2} f_0 B \mu_0 u_y + \left[ (\eta - 1) \cos \theta - \frac{a_y}{g} \right] h + \frac{1}{\rho g} \gamma a \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} f_0 B \tau_0 - B \cos \theta = 0 \quad (3.71)$$

$$h \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_x \frac{\partial h}{\partial x} = u_y \quad (3.29)$$

Usando a notação matricial foi denominada a matriz  $M$  e os vetores  $\frac{\partial y}{\partial x}$  e  $F$ :

$$M = \begin{bmatrix} \cos \theta & \frac{v_x}{g} \\ v_x & h \end{bmatrix} \quad (3.72)$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h}{\partial x} \\ \frac{\partial v_x}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (3.73)$$

$$F = \begin{bmatrix} - \left( \frac{a_x}{g} + f \eta \cos \theta + \sin \theta \right) \\ u_y \end{bmatrix} \quad (3.74)$$

O sistema foi reescrito na forma:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = M^{-1}F \quad (3.75)$$

Portanto, para se obter uma solução para o sistema a matriz  $M$  deve ser inversível, o que implica em  $\det(M) \neq 0$ . O determinante calculado para essa matriz é:

$$\det(M) = h \cos \theta - \frac{v_x^2}{g} \quad (3.76)$$

Assim, a matriz  $M$  admitirá inversa nas condições em que  $\det(M) \neq 0$ , ou seja:

$$v_x^2 \neq gh \cos \theta \quad (3.77)$$

Admitindo-se que esta condição é satisfeita a matriz inversa  $M^{-1}$  é dada por:

$$M^{-1} = \frac{1}{\det(M)} \begin{bmatrix} h & -\frac{v_x}{g} \\ -v_x & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.78)$$

### 3.4 Estabelecimento das condições de contorno e operacionais para a simulação

As condições definidas para o contorno  $x_0 = 0$  e fornecidas para a resolução do modelo foram a altura de fluido sobre a tela ( $h_0$ ), a velocidade de fluido na direção  $x$  ( $v_{x_0}$ ) e a velocidade de fluido atravessando a tela ( $u_{y_0}$ ).

A altura de fluido sobre a tela na posição  $x_0 = 0$  foi estabelecida considerando-se que uma operação ótima da peneira vibratória requer que a lâmina de fluido ocupe  $\frac{3}{4}$  da área de peneiramento da tela deixando o  $\frac{1}{4}$  de área restante para a secagem do cascalho separado (HOBROCK, 1982a; SCOTT, 2006). Portanto, de acordo com a Figura 3.3 definiu-se que:

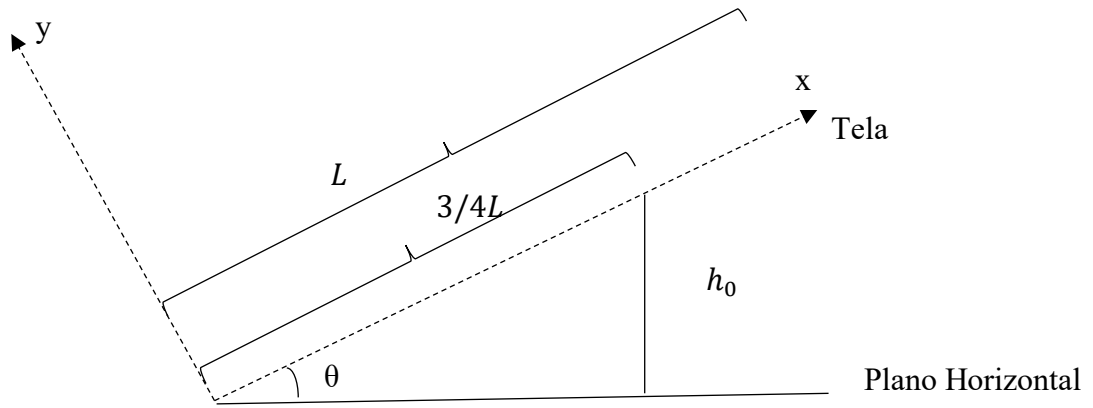


Figura 3.3 – Representação da altura inicial de fluido sobre a tela.

$$h_0 = 3/4L \sin \theta \quad (3.79)$$

A velocidade de fluido escoando ao longo da tela na direção x foi obtida por meio do balanço de massa em um comprimento diferencial  $\delta = 10^{-4}$  m.

$$Q_{x_0} = Q_0 - Q_{y_0} \quad (3.80)$$

Em que:

$$Q_{x_0} = v_{x_0} h_0 Z \quad (3.81)$$

Considerando que a velocidade através da tela possui valor negativo no sentido descendente do eixo y:

$$Q_{y_0} = -u_{y_0} Z \delta \quad (3.82)$$

Logo,

$$v_{x_0} = \frac{Q_0 + u_{y_0} Z \delta}{h_0 Z} \quad (3.83)$$

A velocidade do fluido através da tela no contorno  $x_0 = 0$  é obtida pela Equação 3.84:

$$\left[ \frac{1}{\rho g} \beta \rho \frac{f_0 B (1 - \varepsilon)^2}{D} + \frac{1}{2g} \right] u_{y_0}^2 - \frac{1}{\rho g} \alpha \frac{a^2}{\varepsilon^2} f_0 B \mu_0 u_{y_0} + \left[ (\eta - 1) \cos \theta - \frac{a_y}{g} \right] h_0 + \frac{1}{\rho g} \gamma a \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} f_0 B \tau_0 - B \cos \theta = 0 \quad (3.84)$$

Definidas as condições no contorno, na Tabela 3.1 são apresentados os parâmetros da tela de *mesh* 175x175 analisada através das simulações computacionais.

Tabela 3.1 - Parâmetros para uma tela de *mesh* 175x175.

Parâmetros	
<b>Diâmetro efetivo de abertura <math>D</math> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	95
<b>Diâmetro do fio <math>d_f</math> (mm)</b>	0,05
<b>Espessura <math>B</math> (m)</b>	$1 \times 10^{-4}$
<b>Porosidade <math>\varepsilon</math></b>	0,6435
<b>Superfície específica <math>a</math> (<math>\text{m}^{-1}</math>)</b>	44400

O diâmetro do fio ( $d_f$ ) e o diâmetro efetivo de abertura da tela ( $D$ ) de aço inox de *mesh* 175x175 foram fornecidos pela fabricante (TEGAPE). O cálculo da espessura ( $B$ ) foi determinado a partir da análise de uma amostra de tela apresentada por MARQUES (2017). Para tanto, a trama da tela foi considerada quadrada simples com fios sobrepostos.

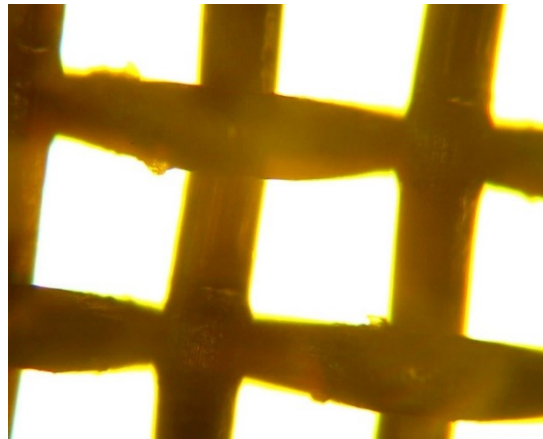


Figura 3.4 – Amostra de uma tela quadrada de *mesh* 175x175.

Portanto a espessura dessa tela foi definida pela Equação 3.85:

$$B = 2d_f \quad (3.85)$$

A porosidade ( $\varepsilon$ ) foi calculada pela Equação 3.86:

$$\varepsilon = 1 - \frac{m}{\rho_t V} \quad (3.86)$$

Em que  $\rho_t$  é a densidade do material do qual é feito o fio da tela e os valores da massa ( $m$ ) e do volume ( $V$ ) foram obtidos por medidas experimentais realizadas por MARQUES (2017) em triplicata (A, B e C). Os valores utilizados encontram-se na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Dados experimentais para o cálculo da porosidade da tela.

	Densidade $\rho_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	Massa $m$ (g)	Volume $V$ (cm <sup>3</sup> )	Porosidade $\varepsilon$	Porosidade Média
<b>A</b>	7,95	2,2677	0,8	0,6434	0,6435
<b>B</b>	7,95	2,2675	0,8	0,6435	
<b>C</b>	7,95	2,2675	0,8	0,6435	
<b>Média</b>	7,95	2,2675	0,8	0,6435	

A superfície específica da tela foi calculada pela Equação 3.50 com o valor de porosidade obtida. Os valores de outros parâmetros operacionais encontram-se resumidos na Tabela 3.3. O comprimento e largura efetivos da tela foram coletados do protótipo descrito por GUERREIRO (2015) e FREITAS (2017). Os parâmetros empíricos  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  foram fornecidos por HOBEROCK (1980).

Tabela 3.3 - Constantes empíricas e parâmetros de operação da peneira.

<b>Parâmetros</b>	
<b>Aceleração da gravidade <math>g</math> (m.s<sup>-2</sup>)</b>	9,81
<b>Comprimento efetivo da tela <math>L</math> (m)</b>	1,06
<b>Largura efetiva da tela <math>Z</math> (m)</b>	0,54
<b><math>\alpha</math></b>	4,13
<b><math>\beta</math></b>	0,25
<b><math>\gamma</math></b>	0,6

### 3.5 Estabelecimento da condição de escoamento do fluido através da tela

Obtém-se a condição de escoamento uma vez estabelecido que a velocidade na direção  $y$  ( $u_y$ ) deve possuir sinal negativo de acordo com a convenção adotada para o eixo sobre a tela. Colocando a Equação 3.71 na forma da Equação 3.87 a seguir:

$$C_1 u_y^2 + C_2 u_y + C_3 = 0 \quad (3.87)$$

Em que:

$$C_1 = \left[ \frac{1}{\rho g} \beta \rho \frac{f_0 B (1 - \varepsilon)^2}{D \varepsilon^3} + \frac{1}{2g} \right] \quad (3.88)$$

$$C_2 = -\frac{1}{\rho g} \alpha \frac{a^2}{\varepsilon^2} f_0 B \mu_0 \quad (3.89)$$

$$C_3 = \left[ (\eta - 1) \cos \theta - \frac{a_y}{g} \right] h + \frac{1}{\rho g} \gamma a \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} f_0 B \tau_0 - B \cos \theta \quad (3.90)$$

Aplicando a restrição de que  $u_y < 0$  obtém-se a seguinte condição de escoamento:

$$a_y > \frac{1}{\rho h_0} \gamma a \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} f_0 B \tau_0 + \left( \eta - 1 - \frac{B}{h_0} \right) g \cos \theta \quad (3.91)$$

### 3.6 Condições de simulação e algoritmo de solução numérica.

As análises das correlações de queda de pressão foram realizadas para uma emulsão de n-parafina (fluido de base não aquosa) com razão sintético/água de 63/37 cujos parâmetros reológicos foram adquiridos por meio de comunicação pessoal. Um outro fluido de base aquosa com concentração mássica de 0,5% de carbopol-941 em água cujos parâmetros reológicos foram obtidos a partir das equações para  $\mu_0$  e  $\tau_0$  fornecidas por CHASE E DACHAVIJIT (2005). A densidade da solução de carbopol-941 foi calculada a partir do valor de densidade relativa ( $\rho_C = 1,2$ ). Na Tabela 3.4 também são apresentados parâmetros reológicos de fluidos a base de goma xantana coletados por BICALHO (2015).

Tabela 3.4 - Parâmetros reológicos dos fluidos simulados.

	<b>N-parafina</b>	<b>Carbopol - 941 (0,5%)</b>	<b>Goma Xantana (0,1%)</b>	<b>Goma Xantana (0,5%)</b>
<b>Densidade <math>\rho</math>, (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1188,76	1001	1000,5	1002,5
<b>Viscosidade Plástica <math>\mu_0</math>, (Pa.s)</b>	0,033	0,0507	0,0057	0,0118
<b>Tensão de Escoamento <math>\tau_0</math>, (Pa)</b>	10,0548	4,584	0,5986	5,7790

As soluções numéricas do modelo foram obtidas utilizando um fluido composto por água e bentonita com densidade igual a 1187 kg/m<sup>3</sup> escoando sobre uma tela quadrada de mesh 175x175 cujos parâmetros estão descritos na Tabela 3.1. Avaliou-se o efeito dos seguintes parâmetros sobre o comprimento de tela molhada ( $L_{tm}$ ): viscosidade plástica do fluido ( $\mu_0$ ), tensão limite de escoamento ( $\tau_0$ ), coeficiente de escoamento ( $\eta$ ), ângulo de inclinação da tela ( $\theta$ ) e força-g transmitida à tela.

As soluções do modelo foram obtidas utilizando uma rotina implementada em *Scilab* 5.5.2 ambientado em sistema operacional Windows 10, 64 bits e processador Intel Core i3 com 2,27 GHz e 4GB de memória RAM. Utilizou-se a função *ode\_root* com capacidade de encontrar raízes usando o solucionador *lsodar* do ODEPACK (HINDMARSH, A. C., 1983). O algoritmo implementado encontra-se representado na Figura 3.4.



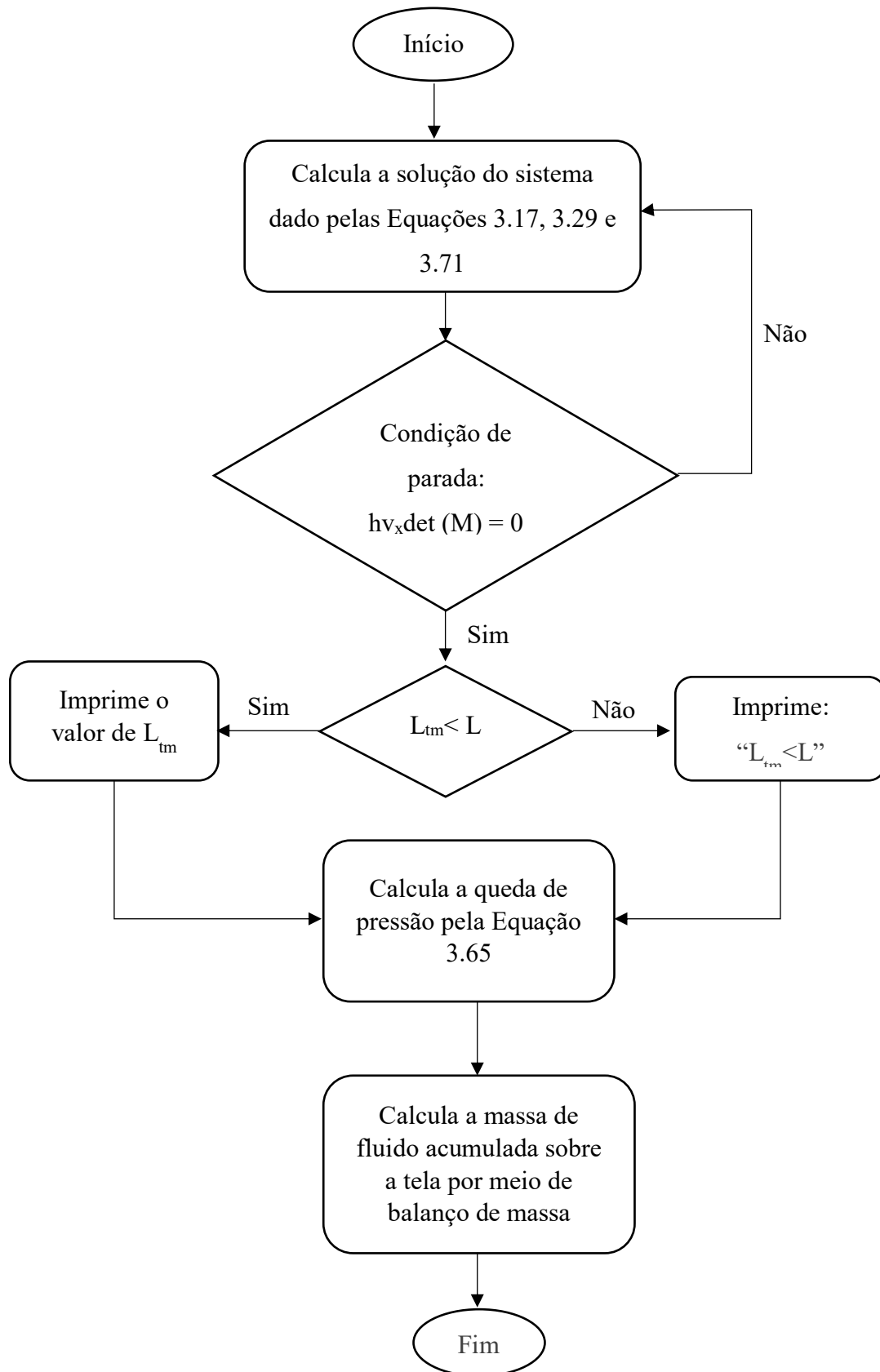


Figura 3.5 – Algoritmo de solução implementado em Scilab.

---

---

# CAPÍTULO 4

---

---

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta uma avaliação da influência de parâmetros operacionais da peneira vibratória sobre a capacidade de processamento da peneira. Essa capacidade foi definida como a vazão de alimentação necessária para que o fluido atinja um determinado comprimento tela molhada, ou seja, o comprimento no qual a lâmina de fluido desaparece através da tela. Análises das correlações de queda de pressão apresentadas no Capítulo 3 são realizadas para fluidos à base de carbopol-941 (fluido de base aquosa) e de n-parafina (fluido de base não aquosa). Além disso, avaliou-se os efeitos dos parâmetros reológicos e operacionais sobre o comprimento de tela molhada para um fluido com bentonita através de simulações computacionais.

### 4.1 Análise de correlações para a queda de pressão de um plástico de Bingham durante o escoamento através de uma tela

As variações da queda de pressão para cada uma das correlações descritas na Seção 3.2 são apresentadas por meio de análises gráficas realizadas com base no escoamento de quatro diferentes fluidos que podem ser caracterizados como um plástico de Bingham. Foram avaliadas as correlações de HOBROCK (1980) (Equação 3.30), HOBROCK (1982) (Equação 3.31), CHASE e DACHAVIJIT (2005) (Equação 3.33), ZHU *et al.* (2012) (Equação 3.37) e a Equação 3.65. A faixa de velocidade foi escolhida de acordo com a velocidade inicial calculada pela Equação 3.84 do escoamento através de uma tela com inclinação de 1° (um grau) na direção ascendente.

As Figuras 4.1 e 4.2 mostram a variação da queda de pressão com a diminuição da velocidade do fluido para uma solução de Carbopol-941 em água com concentração mássica de 0,5%. Os parâmetros reológicos dessa solução são  $\mu_0 = 0,0507 \text{ Pa.s}$  e  $\tau_0 = 4,584 \text{ Pa}$ . Observa-se que a queda de pressão apresenta um comportamento linear comum a todas as

correlações o que permite verificar a predominância do termo relacionado à resistência viscosa no escoamento. Além disso, as correlações obtidas por HOBROCK (1980;1982) apresentam uma queda de pressão alta em relação às demais correlações e a mesma se mantém constante durante a desaceleração do fluido. Uma possível explicação para essa diferença de comportamento reside no fato de que nas correlações propostas por HOBROCK (1980;1982) o termo que contabiliza o efeito do fluido não-newtoniano sobre a queda de pressão considera o escoamento em torno de uma esfera por meio do parâmetro  $\alpha$  (superfície específica) e não através do leito (com  $n_p$  partículas) como um todo.

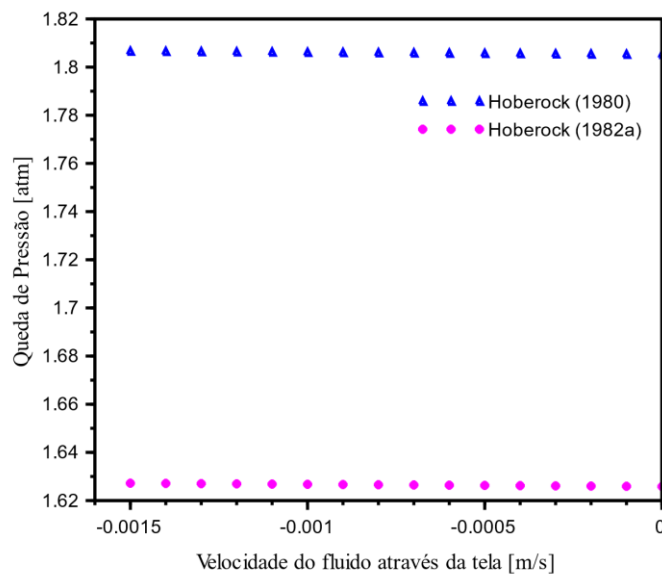


Figura 4.1 – Correlações de Hoberock para a queda de pressão para uma solução de Carbopol-941 0,5% em uma tela de mesh 175x175.

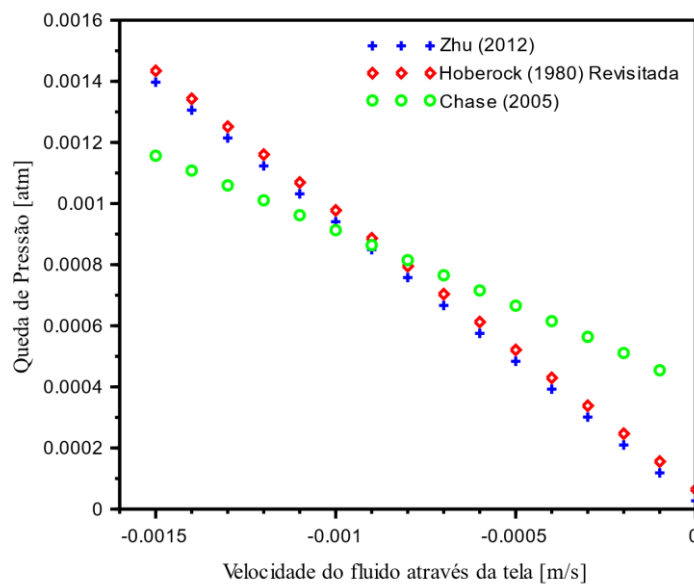


Figura 4.2 – Correlações para a queda de pressão para uma solução de Carbopol-941 0,5% em uma tela de mesh 175x175

A mesma análise foi aplicada à uma solução de goma xantana em água com concentração mássica de 0,1%. As Figuras 4.3 e 4.4 mostram que houve significativa redução na queda de pressão para esse fluido. A explicação pode ser encontrada na comparação dessa solução com a solução de Carbopol-941 em que se observa uma variação expressiva em seus parâmetros reológicos ( $\mu_0 = 0,0057 \text{ Pa.s}$  e  $\tau_0 = 0,5986 \text{ Pa}$ ). Espera-se que um fluido menos viscoso ofereça menor resistência ao escoamento e, assim, a queda de pressão por ele sofrida seja também menor.

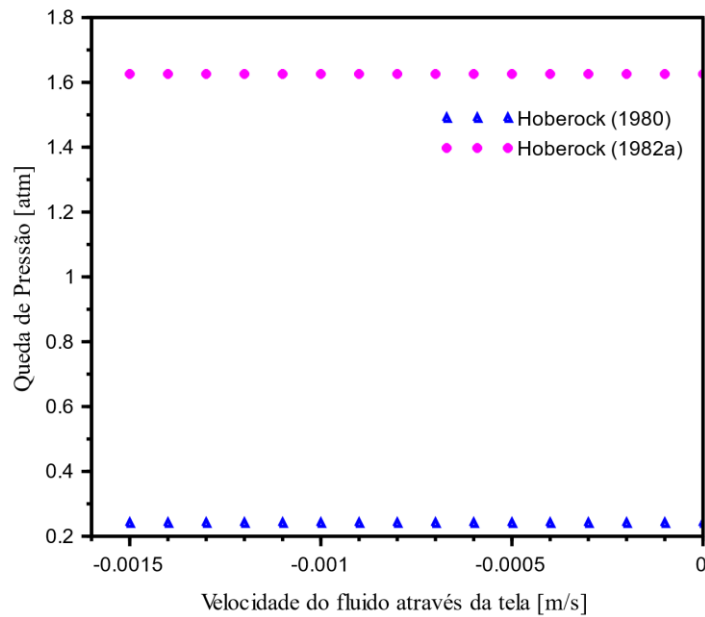


Figura 4.3 – Correlações de Hoberock para a queda de pressão para uma solução de goma xantana 0,1% em uma tela de mesh 175x175.

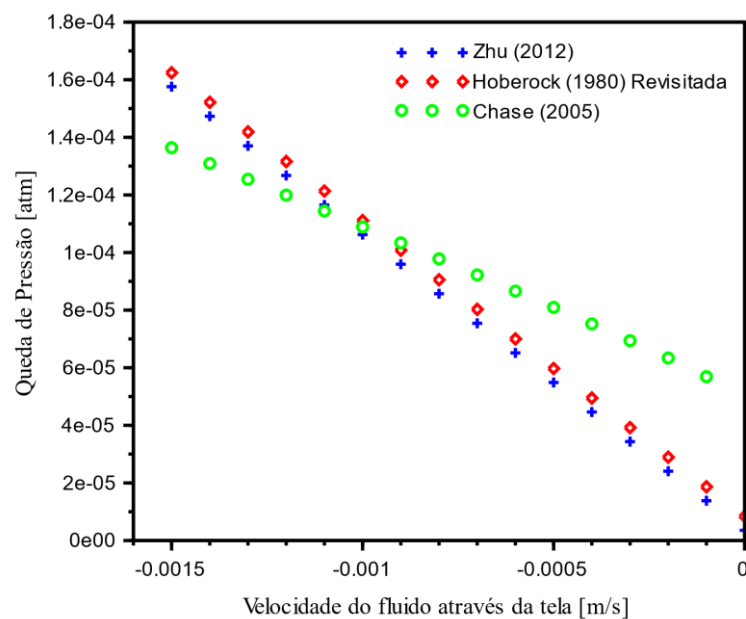


Figura 4.4 - Correlações para a queda de pressão para uma solução de goma xantana 0,1% em uma tela de mesh 175x175.

Aumentando a concentração da solução de goma xantana para 0,5% ( $\mu_0 = 0,0118 \text{ Pa.s}$  e  $\tau_0 = 5,779 \text{ Pa}$ ) nota-se pelas Figuras 4.5 e 4.6 que comparada à solução de goma xantana 0,1% esta apresenta um ligeiro aumento na queda de pressão mais uma vez devido aos parâmetros reológicos desta solução. No entanto, quando comparado à solução de Carbopol-941 0,5%, temos duas soluções com tensões limites de escoamento próximas apresentando um comportamento adverso quanto à queda de pressão. Esse fato leva a crer que a viscosidade plástica tenha uma influência maior neste comportamento do fluido.

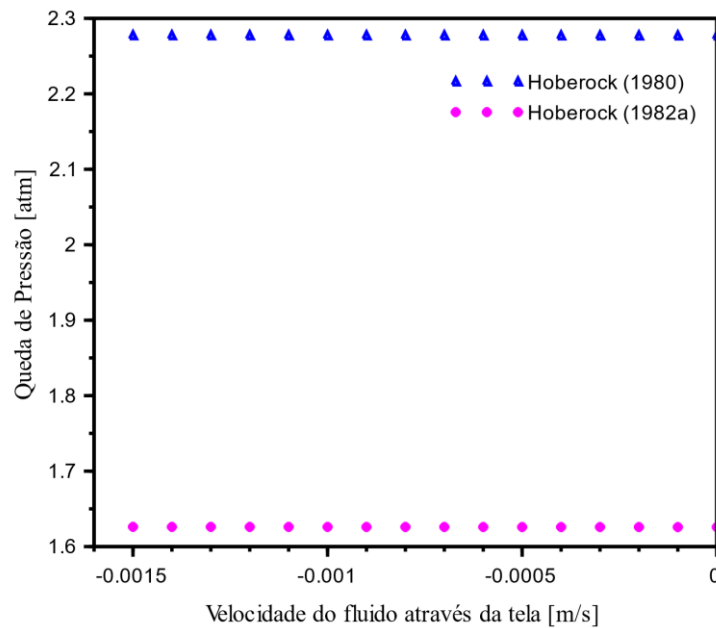


Figura 4.5 – Correlação de Hoberock para a queda de pressão para uma solução de goma xantana 0,5% em uma tela de mesh 175x175.

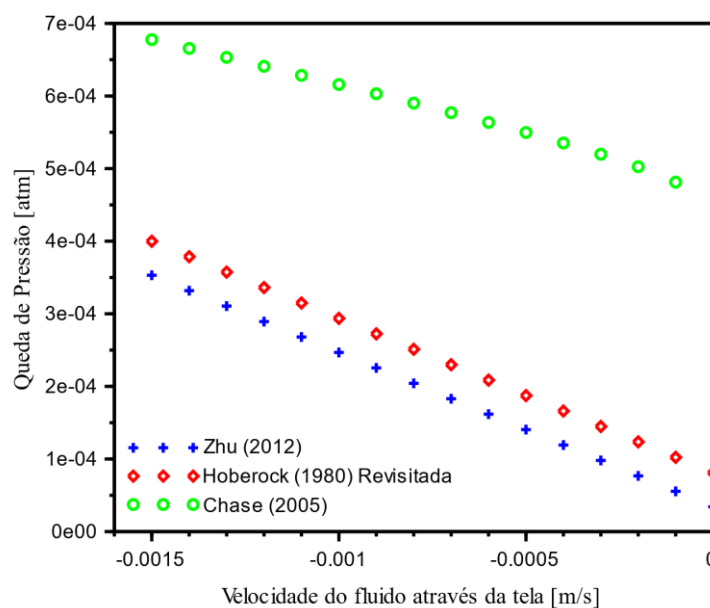


Figura 4.6 – Correlações para a queda de pressão para uma solução de goma xantana 0,5% em uma tela de mesh 175x175.

O efeito que a alteração na viscosidade plástica do fluido possui sobre a queda de pressão é mais evidenciado pelas Figuras 4.7 e 4.8 em que uma solução de n-parafina ( $\mu_0 = 0,033 \text{ Pa.s}$  e  $\tau_0 = 10,0548 \text{ Pa}$ ) possui queda de pressão através da tela mais próxima àquela observada na solução de Carbopol-941. No entanto, a correlação de HOBROCK (1980) se mostrou bastante sensível à alteração na tensão limite de cisalhamento como observa-se nas elevadas variações da queda de pressão apresentada nas figuras até aqui.

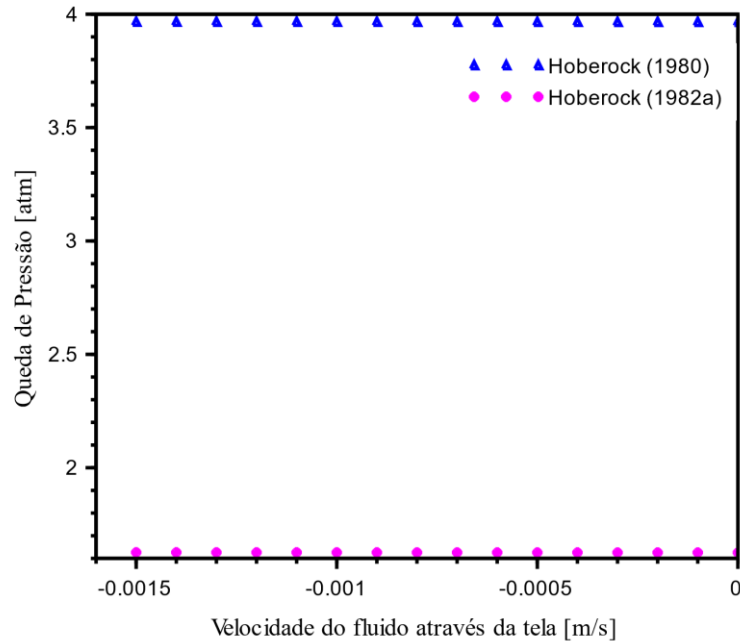


Figura 4.7 – Correlações de Hoberock para a queda de pressão para uma solução de n-parafina em uma tela de mesh 175x175.

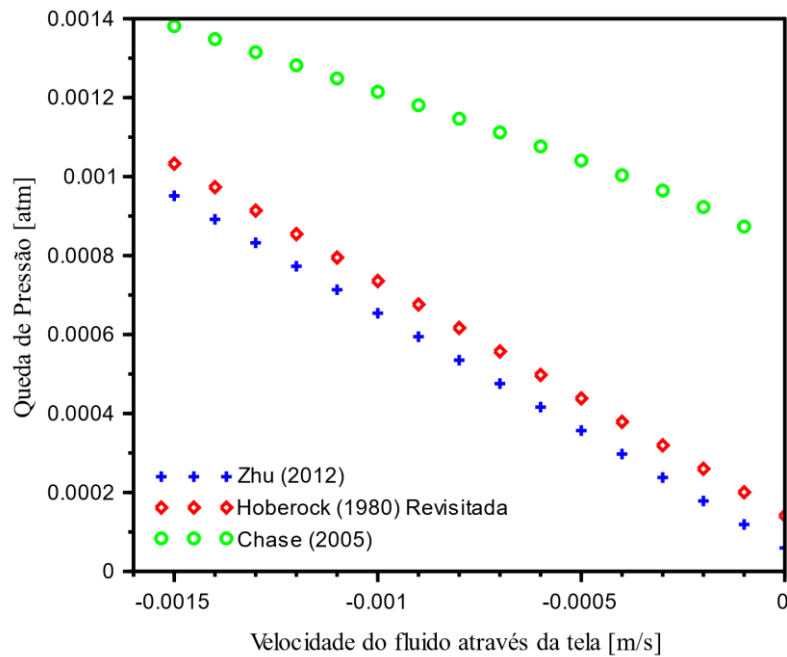


Figura 4.8 – Correlações para a queda de pressão para uma solução de n-parafina em uma tela de mesh 175x175.

## 4.2 Avaliação do efeito de parâmetros operacionais sobre a capacidade de processamento de uma peneira vibratória

O fluido a ser utilizado em uma perfuração é escolhido com base nas características da formação a ser explorada e tem sua classificação de acordo com a fase dispersante. Logo, esses fluidos possuem composição e propriedades reológicas variadas que afetam de diferentes formas o desempenho do processo de peneiramento vibratório. Além do fluido utilizado, a eficiência deste processo é definida por parâmetros operacionais. Nesta seção será analisado o comportamento de um fluido hipotético mediante a alteração nos parâmetros de operação da peneira: viscosidade plástica do fluido ( $\mu_0$ ), tensão limite de escoamento ( $\tau_0$ ), coeficiente de escoamento ( $\eta$ ), ângulo de inclinação da tela ( $\theta$ ) e força-g transmitida à tela.

### 4.2.1 Efeito da viscosidade plástica do fluido sobre o comprimento de tela molhada

As simulações para avaliação do efeito da viscosidade sobre o comprimento de tela molhada ( $L_{tm}$ ) se deram com o estabelecimento da tensão limite de escoamento em 15 Pa, inclinação da tela em 3°, força-g em 1 g e o coeficiente de escoamento em 0,5. Na Tabela 4.1 encontram-se os resultados obtidos para uma vazão de alimentação de  $1,6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Tabela 4.1 – Efeito da viscosidade para uma vazão de alimentação de  $1,6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

$\tau_0$ (Pa)	$\theta$ (°)	Força-g	$\eta$	$\mu_0$ (Pa.s)	$L_{tm}$ (m)
15	3	1	0,5	0,010	0,0889
				0,015	0,1509
				0,020	0,2733

Pelos resultados apresentados pode-se perceber que o aumento da viscosidade plástica quando os demais parâmetros são mantidos fixos causa o aumento do comprimento de tela molhada. Na Figura 4.9 é apresentado o efeito que essa variação tem sobre a altura da coluna de fluido que está sobre a tela durante o peneiramento. Observa-se que na faixa estudada a viscosidade não possui efeito significativo sobre esse comportamento.

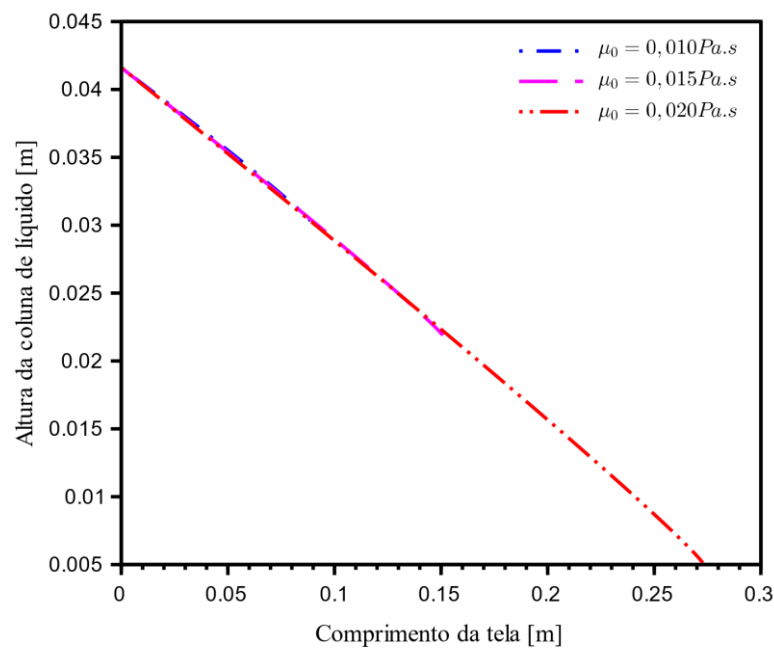


Figura 4.9 – Efeito da viscosidade plástica sobre a altura da coluna de fluido sobre a tela.

O efeito deste parâmetro sobre as velocidades de fluido ao longo e através da tela são mostrados nas Figuras 4.10 e 4.11. Pode-se notar um decaimento mais pronunciado na velocidade ao longo da tela na Figura 4.10 conforme a viscosidade do fluido diminui. Esse efeito é atribuído à menor resistência do fluido em escoar através da tela ocasionado pela baixa viscosidade.

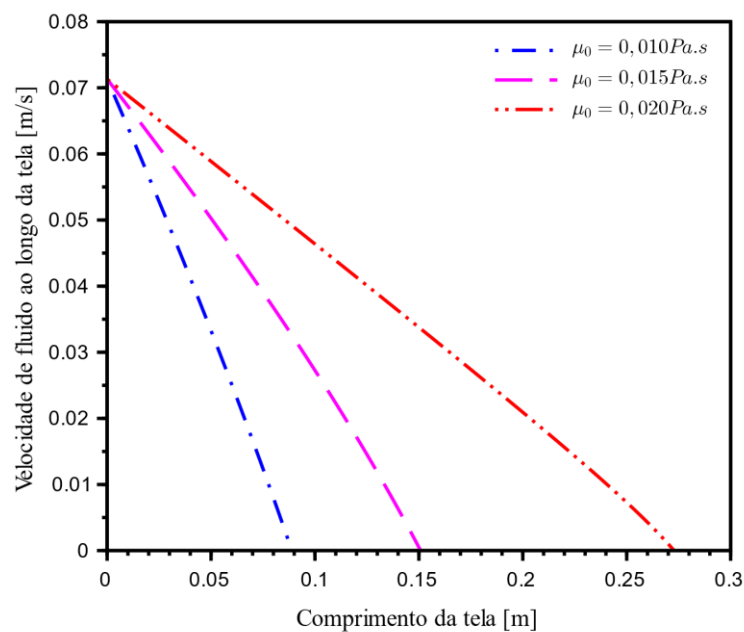


Figura 4.10 - Efeito da viscosidade plástica sobre a velocidade de fluido ao longo da tela.



A Figura 4.11 corrobora essa análise ao demonstrar que em um fluido mais viscoso a velocidade com que o mesmo atravessa a tela é menor e aumenta conforme a viscosidade deste fluido diminui.

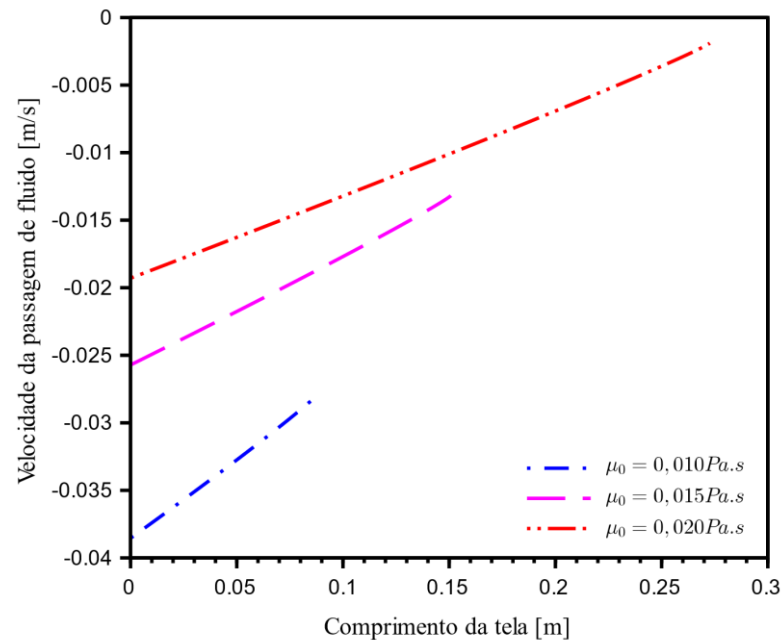


Figura 4.11 – Efeito da viscosidade plástica sobre a velocidade da passagem de fluido através da tela.

Tem-se ainda a Figura 4.12 que mostra como a queda de pressão através da tela varia com alterações na viscosidade do fluido. O resultado obtido está de acordo com as análises realizadas para fluidos reais apresentadas anteriormente.

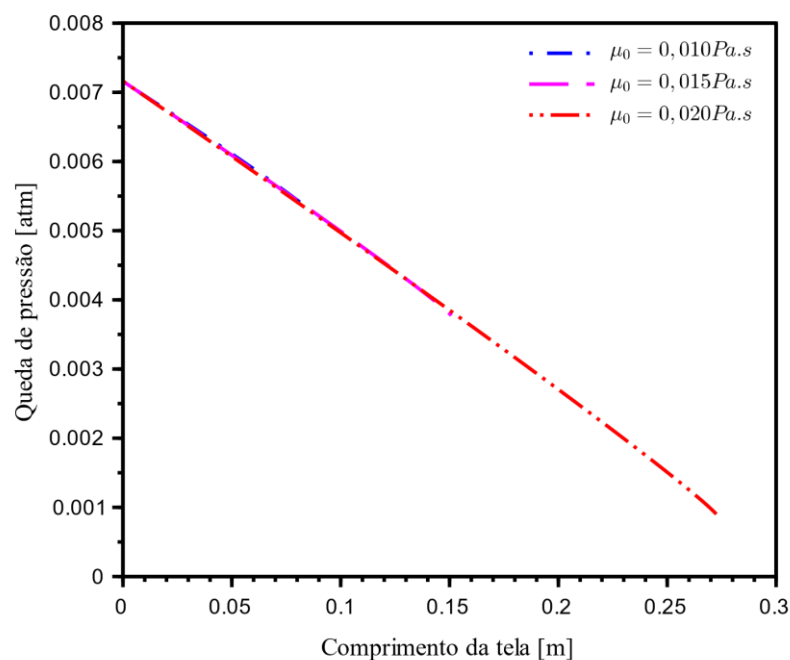


Figura 4.12 – Efeito da viscosidade plástica sobre a queda de pressão através da tela.

Por fim, a Figura 4.13 apresenta a capacidade de processamento da peneira em questão sob influência deste parâmetro. Pelos resultados apresentados pode-se inferir o quanto é possível aumentar a vazão de fluido alimentado à peneira para que a mesma opere de forma mais eficiente. No caso apresentado, por exemplo, o fluido com a viscosidade de 20 cP (0,020 Pa.s) alcança um comprimento de aproximadamente 27 cm de um total de 1,06 m de tela disponível para uma vazão de  $1,6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ . Como o caso estudado não considera a presença de sólidos de perfuração no fluido, esta é a capacidade máxima de operação da peneira para as condições avaliadas.

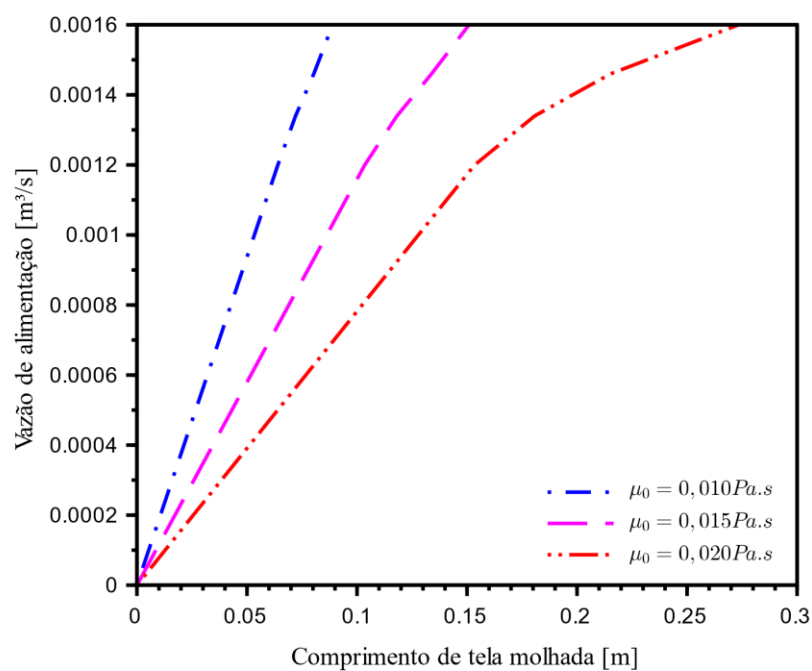


Figura 4.13 – Efeito da viscosidade plástica sobre a capacidade de processamento da peneira.

#### 4.2.2 Efeito da tensão limite de escoamento sobre o comprimento de tela molhada

Foram fixados os parâmetros  $\mu_0$ ,  $\theta$ ,  $\eta$  e Força-g e a tensão teve seu valor alterado entre 7 e 15 Pa. A Tabela 4.2 descreve estes parâmetros com os respectivos resultados para uma vazão de  $1,6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ . Nota-se que o comprimento de tela molhada é pouco sensível aos efeitos deste parâmetro.

Tabela 4.2 - Efeito da tensão de escoamento para uma vazão de alimentação de  $1,6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

$\mu_0 \text{ (Pa.s)}$	$\theta \text{ (}^\circ\text{)}$	Força-g	$\eta$	$\tau_0 \text{ (Pa)}$	$L_{tm} \text{ (m)}$
0,020	3	1	0,5	7	0,2476
				10	0,2552
				12	0,2613
				15	0,2733

Pela análise das Figuras 4.14 a 4.17 é possível observar que a baixa sensibilidade a variações na tensão de escoamento do fluido não é restrita ao comprimento da tela ocupado pelo fluido. Ela também é estendida à forma com que esse fluido se comporta (variações de altura, velocidade e queda de pressão).

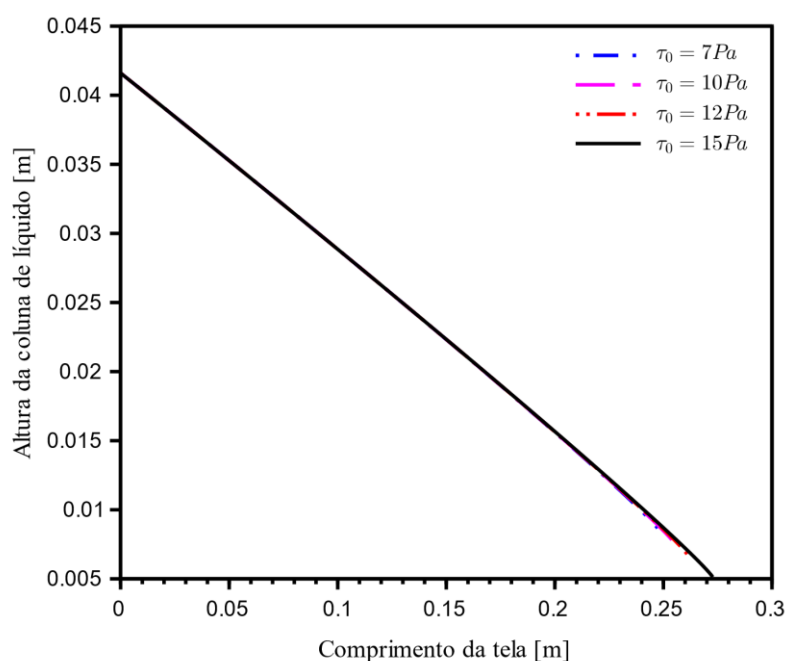


Figura 4.14 – Efeito da tensão de escoamento sobre a altura da coluna de fluido sobre a tela.

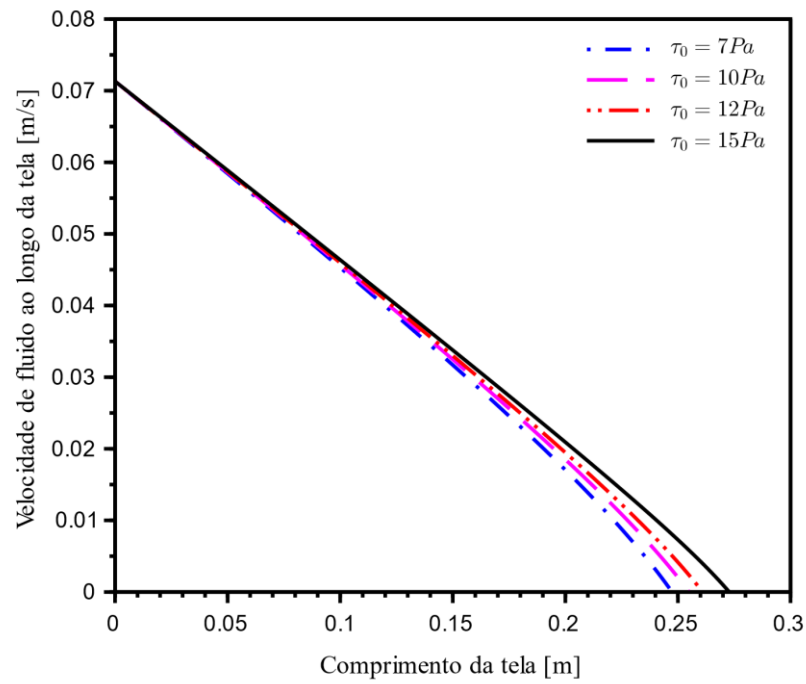


Figura 4.15 - Efeito da tensão de escoamento sobre a velocidade de fluido ao longo da tela.

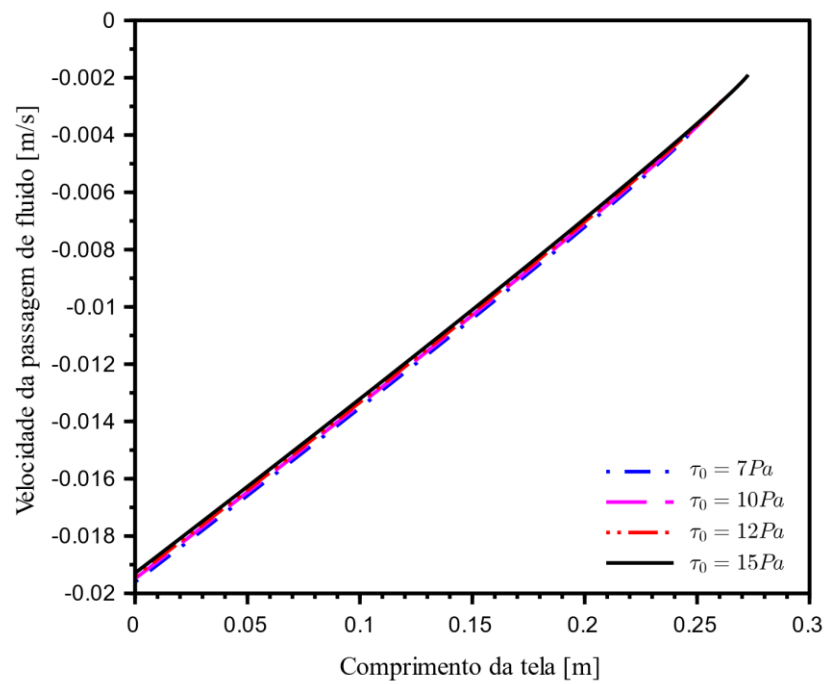


Figura 4.16 - Efeito da tensão de escoamento sobre a velocidade da passagem de fluido através da tela.

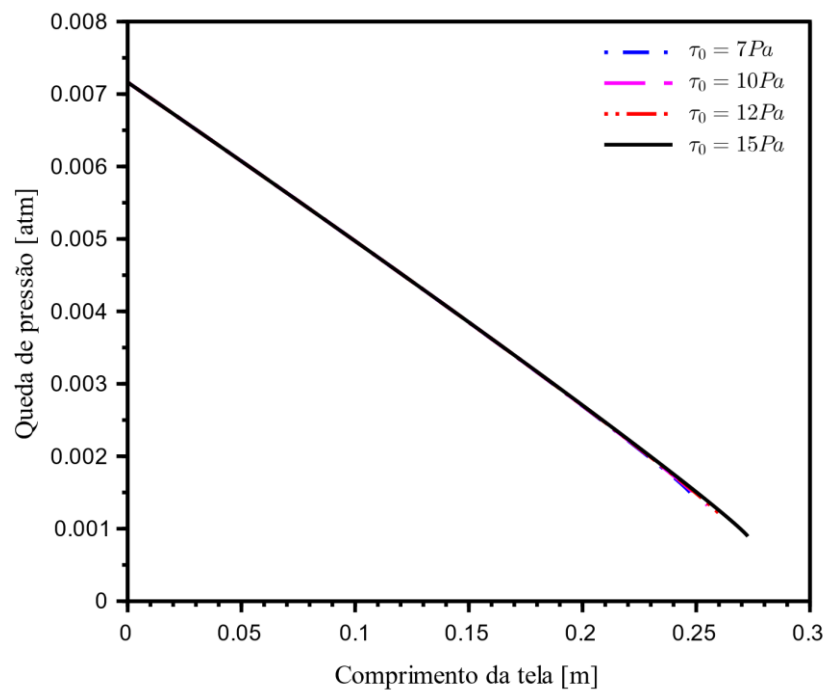


Figura 4.17 – Efeito da tensão de escoamento sobre a queda de pressão através da tela.

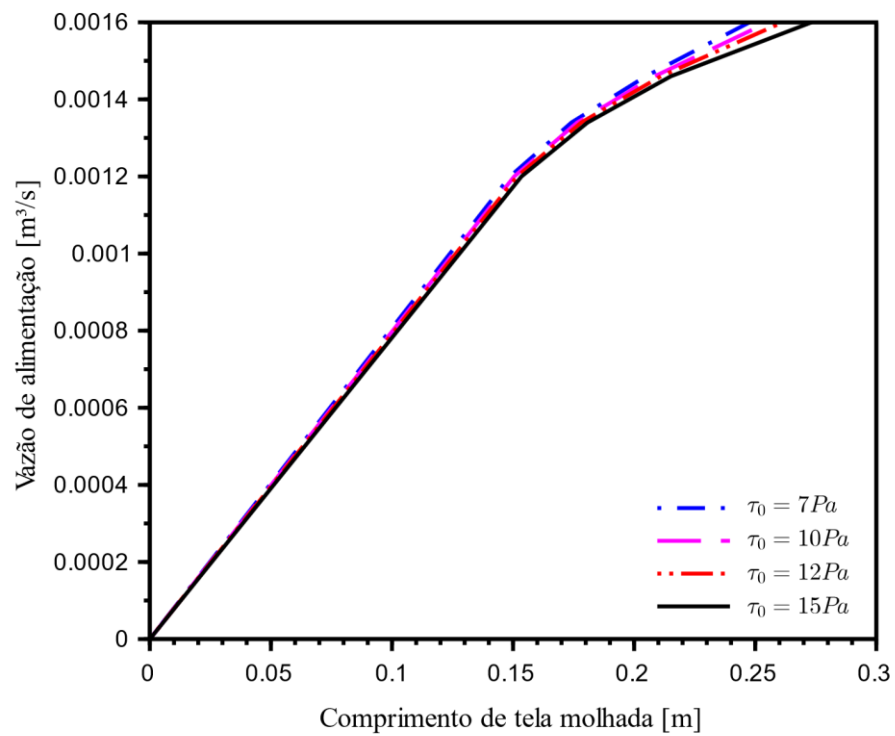


Figura 4.18 – Efeito da tensão de escoamento sobre a capacidade de processamento da peneira.

#### 4.2.3 Efeito da inclinação sobre o comprimento de tela molhada

Telas em peneiras vibratórias são inclinadas (direção ascendente ou descendente) com o intuito de melhorar a capacidade de processamento desses equipamentos. Porém, estudos realizados por HOBROCK (1980) mostraram que essa melhoria se torna mais evidente quando a tela é inclinada na direção ascendente e com uma inclinação máxima de 5°. Foram realizadas simulações para comprovar este efeito a partir do modelo desenvolvido neste trabalho. Na Tabela 4.3 são apresentados os resultados obtidos para o estudo da influência da variação da inclinação da tela com os parâmetros  $\mu_0$ ,  $\tau_0$ ,  $\eta$  e Força-g fixos.

Tabela 4.3 – Efeito da inclinação da tela para uma vazão de alimentação de  $1,6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

$\mu_0$ (Pa.s)	$\tau_0$ (Pa)	Força-g	$\eta$	$\theta$ (°)	$L_{tm}$ (m)
0,010	7	1	0,2	1	0,2855
				3	0,0691
				5	0,0398

O resultado apresentado na Tabela 4.3 pode ser melhor visualizado na Figura 4.19 em que se percebe uma redução em aproximadamente quatro vezes o comprimento de tela molhada quando é variada a inclinação da tela de 1° para 3°. Quando a inclinação é aumentada para 5° o efeito não se mostra tão significativo embora ainda exista e seja perceptível.

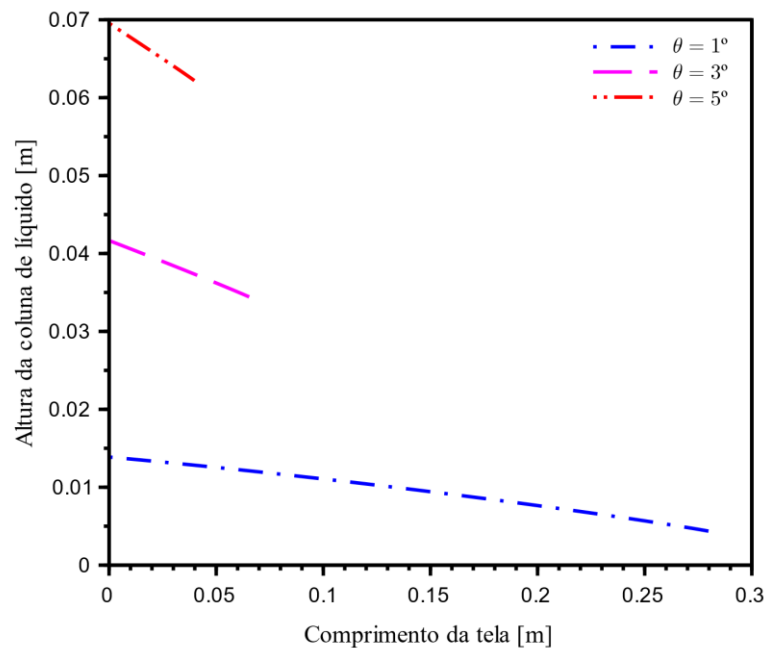


Figura 4.19 – Efeito da inclinação sobre a altura da coluna de fluido sobre a tela.

Nas Figuras 4.20 e 4.21 tem-se o efeito causado pela variação deste parâmetro sobre as componentes da velocidade do fluido. Na direção x a velocidade de escoamento do fluido é maior para telas com inclinações menores. Isso deve-se ao fato de que com o aumento da inclinação a tela tende a oferecer maior resistência ao escoamento do fluido por sua superfície. Como consequência, a velocidade da passagem do fluido através da tela é maior quanto maior for a inclinação uma vez que ocorre a formação de uma “piscina” de fluido no início da tela fazendo com que o mesmo exerça maior pressão sobre os poros da tela facilitando sua passagem.

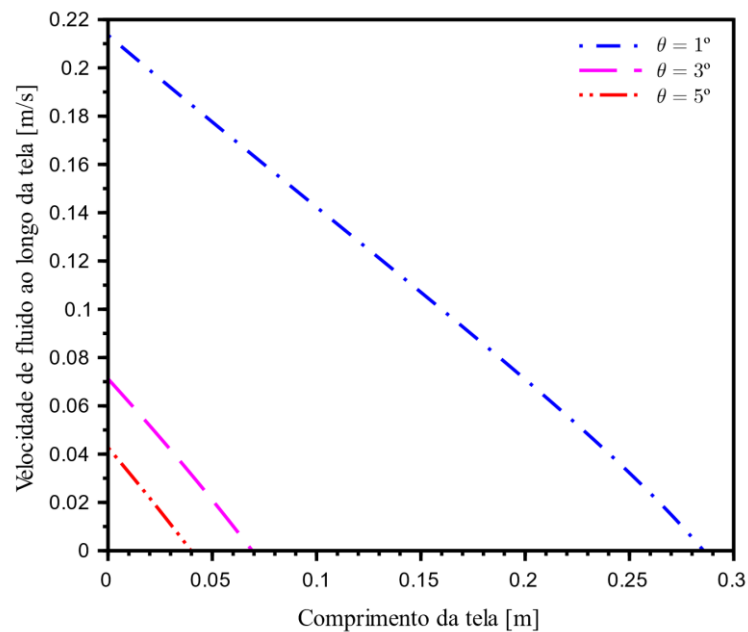


Figura 4.20 – Efeito da inclinação sobre a velocidade de fluido ao longo da tela.

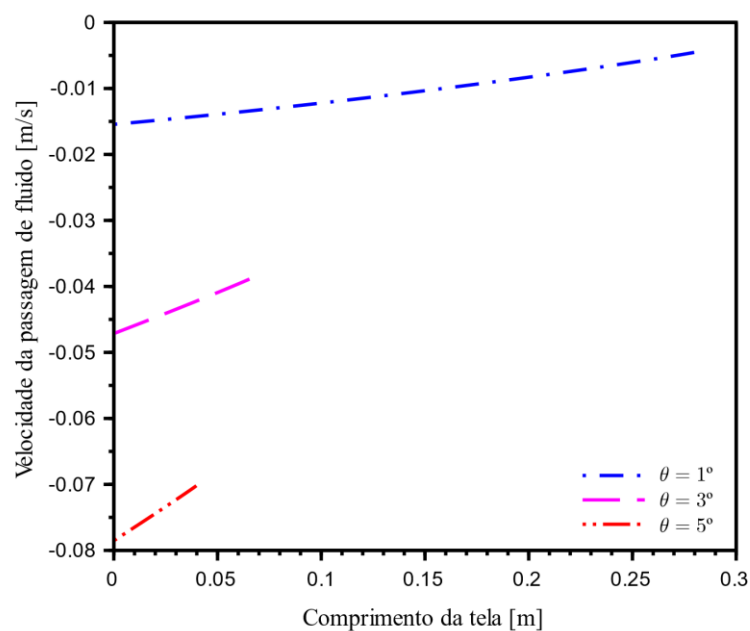


Figura 4.21 – Efeito da inclinação sobre a velocidade da passagem de fluido através da tela.

Portanto, a Figura 4.22 mostra que a queda de pressão é menor para inclinações menores e é afetada de forma significativa por modificações neste parâmetro. A capacidade de processamento é mostrada na Figura 4.23 e nota-se que o aumento na inclinação é altamente vantajoso para melhorar a eficiência do peneiramento uma vez que as simulações indicam que pode ser alimentado mais fluido à peneira quando se realiza essa alteração.

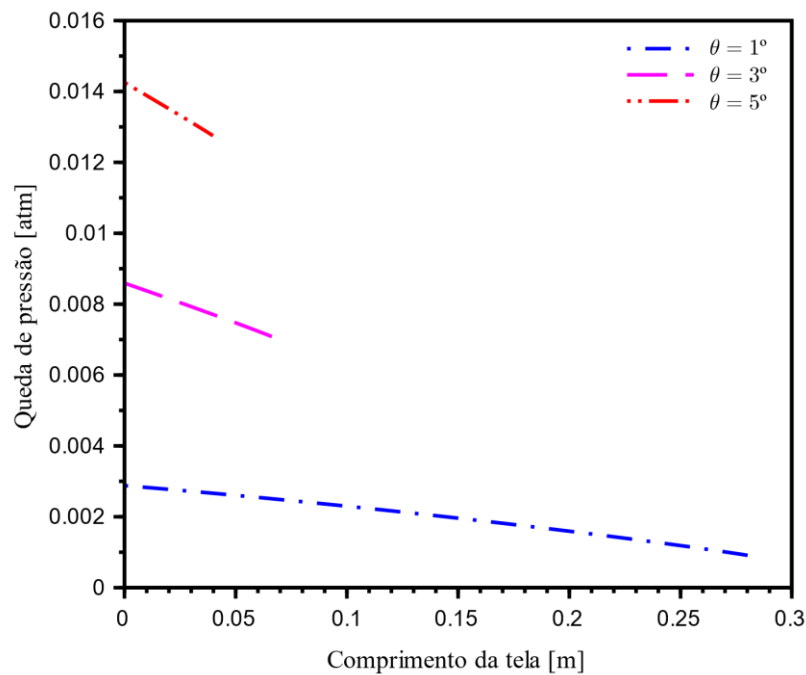


Figura 4.22 – Efeito da inclinação sobre a queda de pressão através da tela.

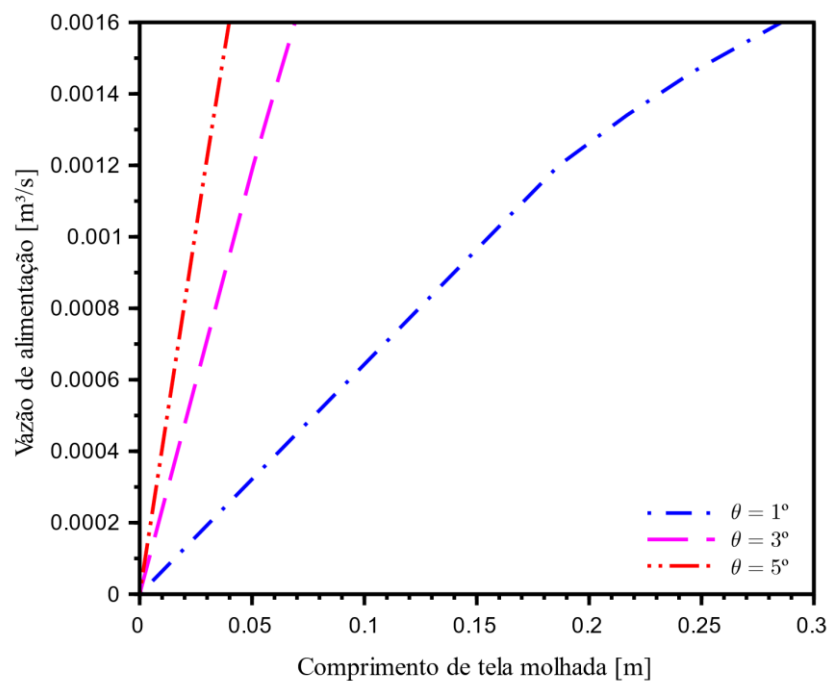


Figura 4.23 - Efeito da inclinação sobre a capacidade de processamento da peneira.



#### 4.2.4 Efeito da força-g sobre o comprimento de tela molhado

A força-g diz respeito à aceleração transmitida à peneira e é uma razão entre essa aceleração e a aceleração gravitacional da Terra (g). Nas simulações realizadas variou-se a força-g em uma faixa de 1g a 5g e os demais parâmetros encontram-se na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Efeito da força-g para uma vazão de alimentação de  $1,6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

$\mu_0$ (Pa.s)	$\tau_0$ (Pa)	$\theta$ (°)	$\eta$	Força-g	$L_{tm}$ (m)
0,020	15	3	0,5	1	0,2728
				3	0,0853
				5	0,0520

Nela percebemos a influência do aumento da força-g para a diminuição do comprimento de tela molhada e consequente aumento na capacidade de processamento de fluido pela peneira. A Figura 4.24 apresenta o comportamento da altura da coluna de fluido sobre a tela. Conforme o esperado a altura mantém-se menor em situações em que a força-g transmitida à tela é elevada e apresenta um decaimento mais acentuado que aquele provocado por força-g menor.

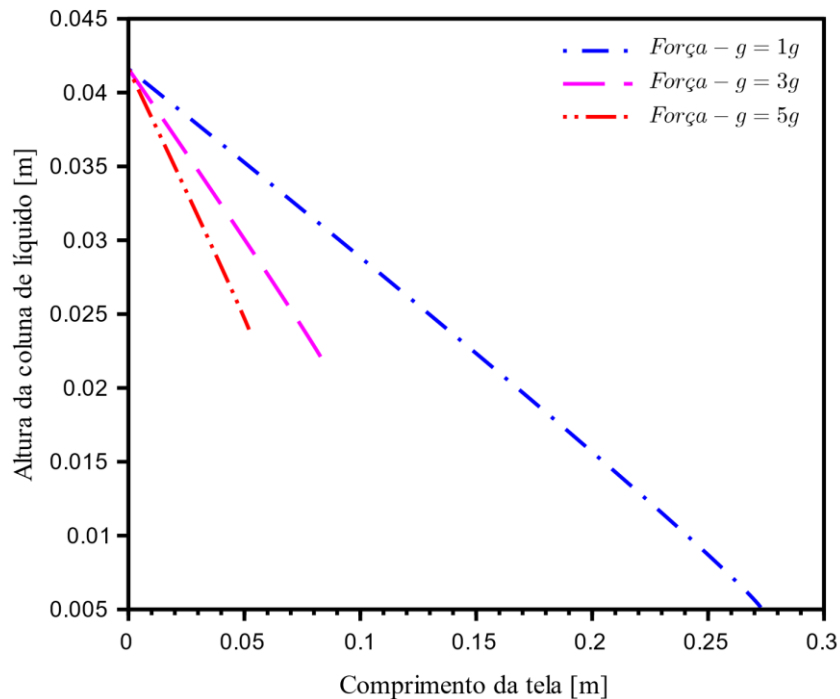


Figura 4.24 – Efeito da força-g sobre a altura da coluna de fluido sobre a tela.

A velocidade na direção x (Figura 4.25) exibe um declínio maior conforme a força-g aumenta uma vez que o intuito de se aplicar este tipo de aceleração à tela é auxiliar no movimento do fluido através da tela e, como mostrado na Figura 4.26, isso de fato ocorre visto que as velocidades de passagem do fluido são maiores de acordo com o aumento deste parâmetro.

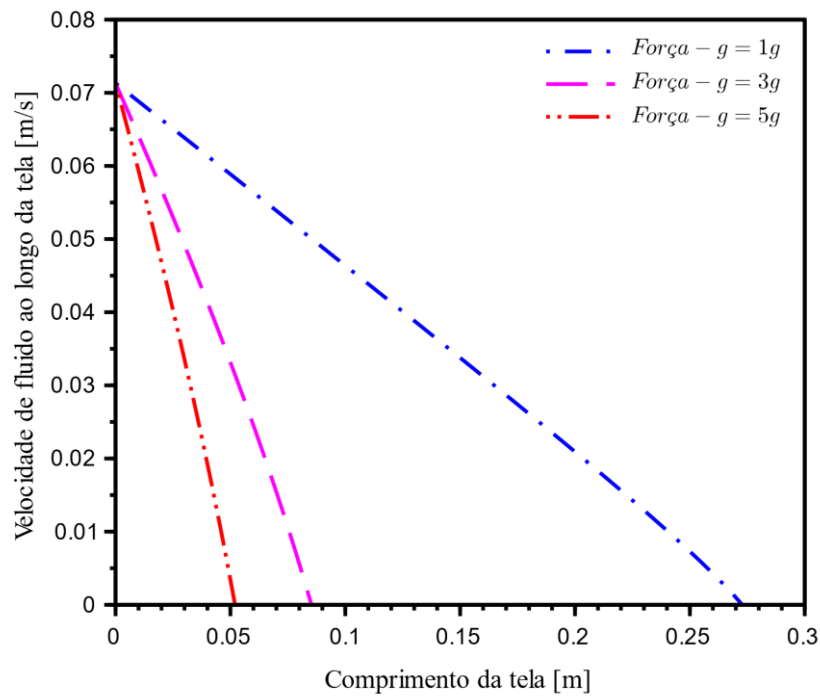


Figura 4.25 - Efeito da força-g sobre a velocidade de fluido ao longo da tela.

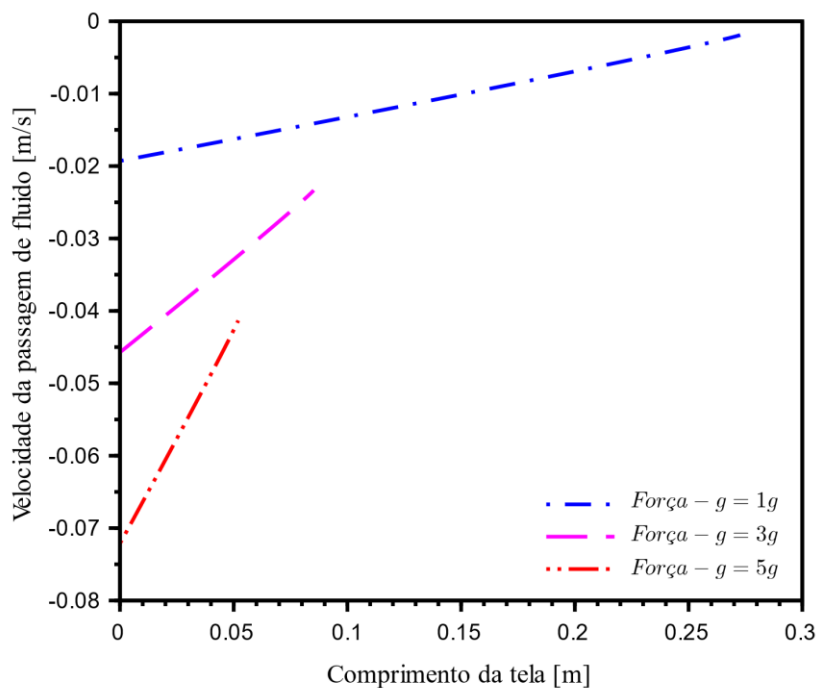


Figura 4.26 - Efeito da força-g sobre a velocidade da passagem de fluido através da tela.

Na Figura 4.27 nota-se a consequência da elevação da força- $g$  sobre a queda de pressão através da tela. Como a velocidade é maior para esses casos a queda de pressão também será. É importante ressaltar que a elevada queda de pressão apresentada na Figura 4.27 para os valores e força- $g$  de 3g e 5g deve-se também à viscosidade ( $\mu_0 = 20 \text{ cP}$ ) utilizada que contribui para o aumento da perda de carga no escoamento. A Figura 4.28 mostra que aumentando a força- $g$  do sistema é possível também aumentar a vazão a ele alimentada.

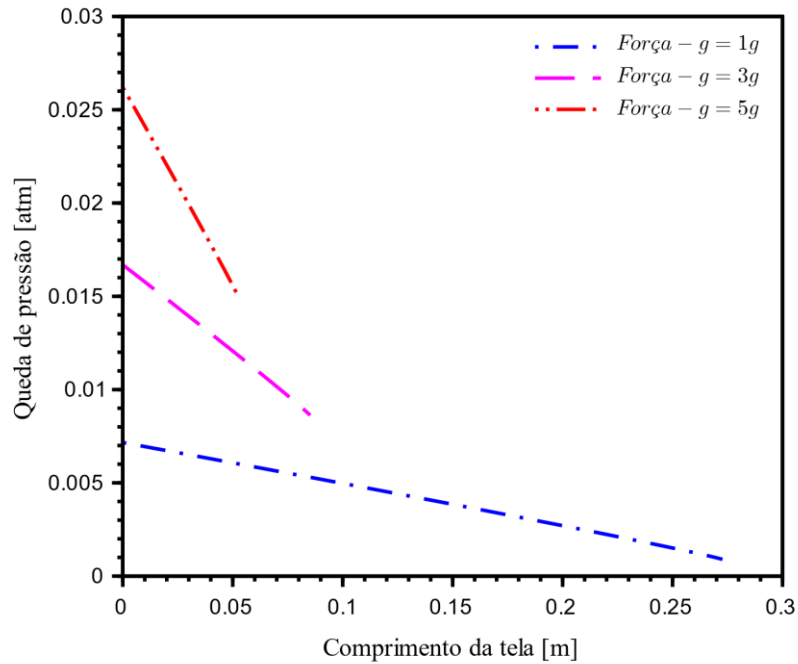


Figura 4.27 - Efeito da força- $g$  sobre a queda de pressão através da tela.

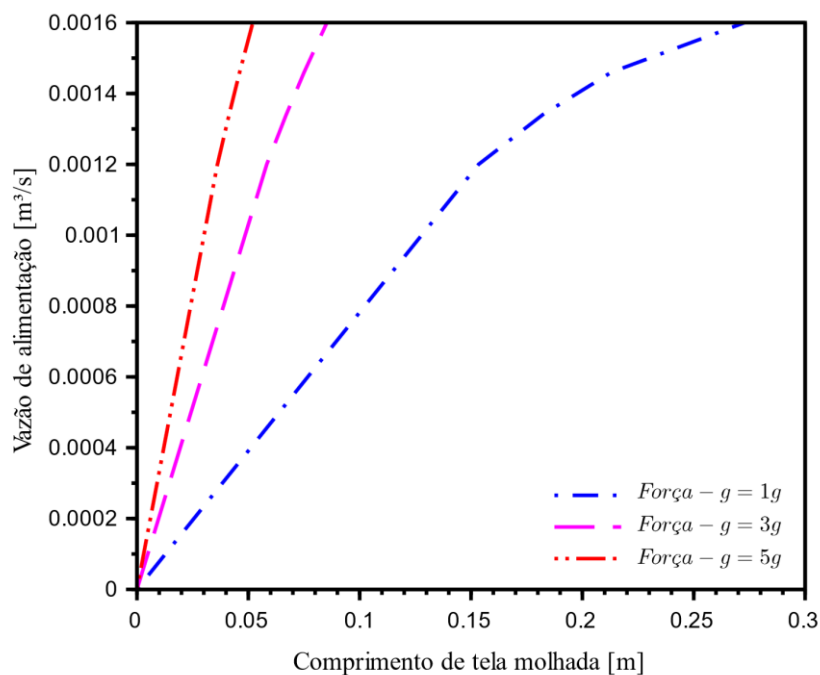


Figura 4.28 - Efeito da inclinação sobre a capacidade de processamento da peneira.

O aumento da força-g no sistema é benéfico devido ao fato de que a transmissão desse tipo de aceleração permite que a tela realize o cisalhamento do fluido diminuindo sua viscosidade e consequentemente aumentando a capacidade de processamento da peneira. As tabelas a seguir apresentam o efeito da variação desse fator sobre o comprimento de tela molhada ( $L_{tm}$ ) para inclinações de  $\theta = 1^\circ$  (Tabela 4.5) e  $\theta = 3^\circ$  (Tabela 4.6) em um fluido a base de Carbopol-941 com um coeficiente de escoamento  $\eta = 1$ .

Tabela 4.5 – Efeito da força-g para uma vazão de alimentação de  $3,16 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  e inclinação de  $1^\circ$ .

Fluido	$\theta$ ( $^\circ$ )	$\eta$	Força-g	$L_{tm}$ (m)
Carbopol-941 (0,5%)	1	1	1	0,1391
			3	0,0396
			5	0,0232

Em ambas as tabelas a transição da força-g = 1 para força-g = 3 apresentou uma queda expressiva em  $L_{tm}$  causado pelo aumento do movimento da tela contra o fluido. A partir deste valor ocorrem alterações no valor de  $L_{tm}$  que podem, no entanto, ser consideradas desprezíveis em vista da significativa diminuição no comprimento da tela molhada obtida para o caso anterior.

Tabela 4.6 – Efeito da força-g para uma vazão de alimentação de  $3,16 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  e inclinação de  $3^\circ$ .

Fluido	$\theta$ ( $^\circ$ )	$\eta$	Força-g	$L_{tm}$ (m)
Carbopol-941 (0,5%)	3	1	1	0,1837
			3	0,0427
			5	0,0246

Foi examinado também o efeito gerado por aplicar a força-g ao sistema em cada uma das componentes da aceleração da tela isoladamente mantendo a outra como uma aceleração nula. A Tabela 4.7 apresenta os resultados para a simulação com  $\theta = 3^\circ$  e  $\eta = 1$ . O mesmo comportamento observado quando a força-g é aplicada às duas componentes da aceleração foi obtido aqui. Para força-g<sub>y</sub> = 1 houve um decaimento em  $L_{tm}$  se comparado aos valores da Tabela 4.6. Porém para os demais valores de força-g<sub>y</sub> o comprimento praticamente foi mantido.

Tabela 4.7 – Efeito da força-g aplicada à direção y com  $\theta = 3^\circ$  e  $\eta = 1$ .

Fluido	$\theta$ (°)	$\eta$	Força-g <sub>y</sub>	$L_{tm}$ (m)
Carbopol-941 (0,5%)	3	1	1	0,1457
			3	0,0394
			5	0,0229

Por outro lado, quando a força-g é aplicada somente à componente x da aceleração da tela ( $a_x$ ) o comprimento obtido é bastante elevado para quaisquer valores testados como mostrado na Tabela 4.10. Vale ressaltar que o caso simulado consiste em  $\eta = 0,9$  e tela na direção horizontal, ou seja, com inclinação nula.

Tabela 4.8 – Efeito da força-g aplicada à direção x com  $\theta = 0^\circ$  e  $\eta = 0,9$ .

Fluido	$\theta$ (°)	$\eta$	Força-g <sub>x</sub>	$L_{tm}$ (m)
Carbopol-941 (0,5%)	-	0,9	1	0,1393
			3	0,1526
			5	0,1774

Pode-se inferir que a passagem de fluido através da tela é altamente afetada pela aceleração perpendicular à tela e o efeito da aceleração paralela é insignificante para esse fim. Esse fato já era esperado de acordo com as observações feitas por ASME (2005) de que o movimento da tela para “cima” favorece a passagem do fluido enquanto o movimento da tela para a “frente” favorece o transporte de sólidos, quando presentes.

#### 4.2.5 Efeito do coeficiente de escoamento sobre o comprimento de tela molhada

O coeficiente de escoamento é uma medida da resistência oferecida pela tela ao escoamento do fluido. Para o fluido hipotético os resultados para a vazão de  $1,6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  são apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Efeito do coeficiente de escoamento para uma vazão de alimentação de  $1,6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

$\mu_0$ (Pa.s)	$\tau_0$ (Pa)	$\theta$ (°)	Força-g	$\eta$	$L_{tm}$ (m)
0,010	10	3	1	0	0,0614
				0,5	0,0876
				0,9	0,1372
				1	0,1632

Como mostrado pela Figura 4.29 o aumento no coeficiente de escoamento causa também o aumento do comprimento de tela coberta pelo fluido. Quando  $\eta$  possui seu valor

mínimo ( $\eta = 0$ ) o comprimento de tela também atinge seu valor mínimo uma vez que a resistência da tela ao escoamento é reduzida nesse caso.

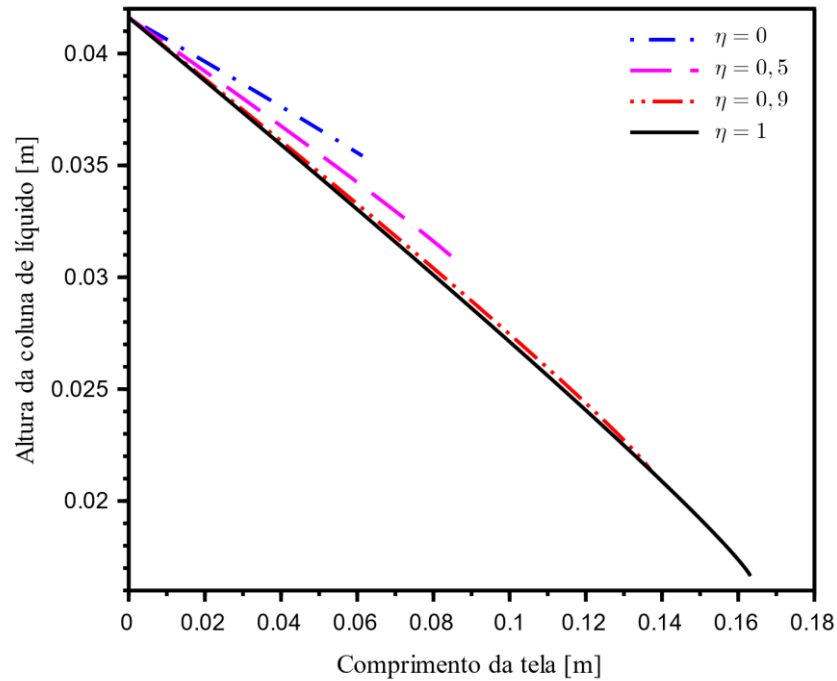


Figura 4.29 – Efeito do coeficiente de rendimento sobre a altura da coluna de fluido sobre a tela.

As Figuras 4.30 e 4.31 corroboram esse efeito da resistência oferecida pela tela ao mostrarem que, na direção x, a velocidade quando  $\eta$  é mínimo encontra seu menor valor com um decaimento bastante acentuado na curva.

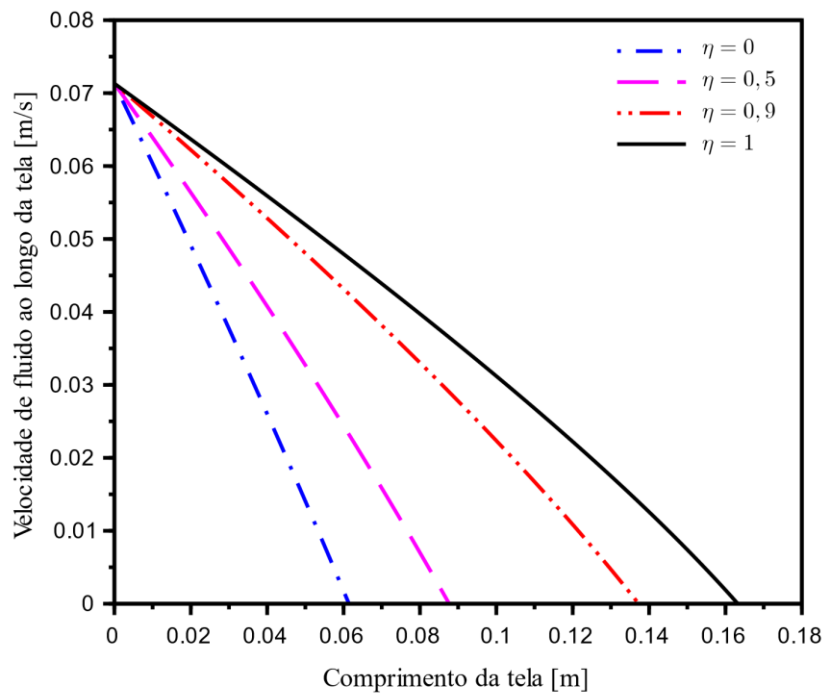


Figura 4.30 - Efeito do coeficiente de escoamento sobre a velocidade de fluido ao longo da tela.

Na Figura 4.31 tem-se que a velocidade de passagem aumenta conforme a resistência da tela diminui, ou seja, com a diminuição de  $\eta$ . Em decorrência desse resultado a queda de pressão através da tela representada na Figura 4.32 é maior nesses casos. Logo, a capacidade de processamento da peneira apresentada na Figura 4.33 está intensamente relacionada a variações neste parâmetro empírico do modelo. Ou seja, a eficiência do processo está diretamente ligada a resistência oferecida pela tela.

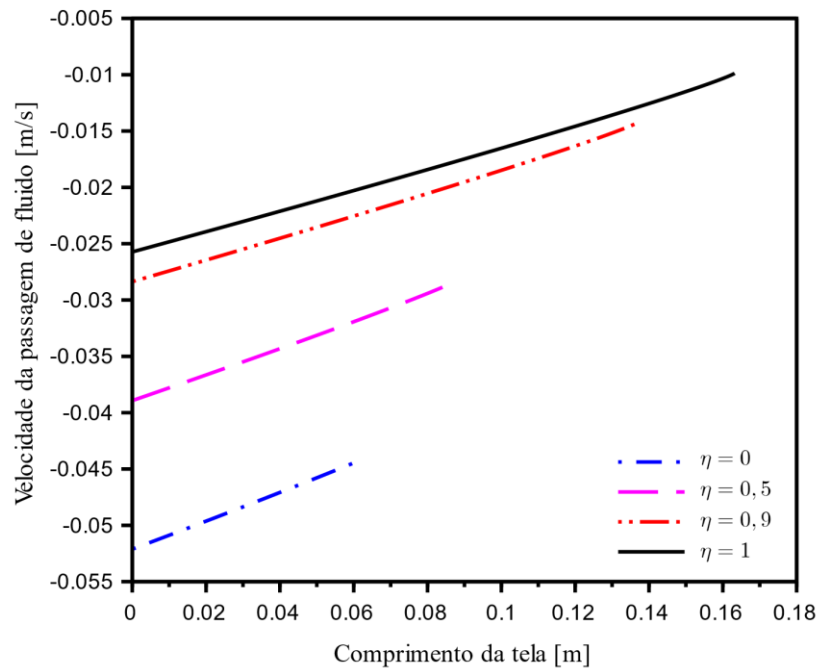


Figura 4.31 – Efeito do coeficiente de escoamento sobre a velocidade da passagem de fluido através da tela.

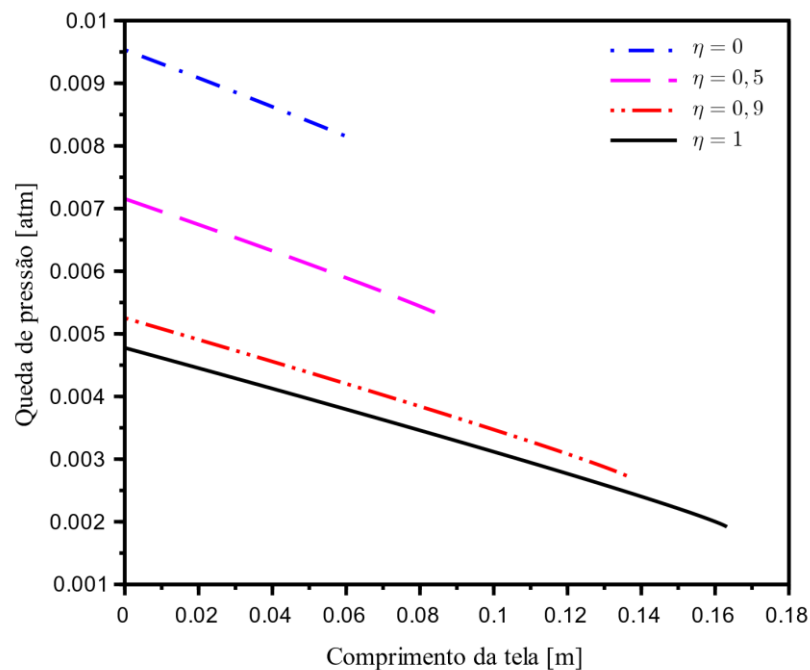


Figura 4.32 – Efeito do coeficiente de escoamento sobre a queda de pressão através da tela.

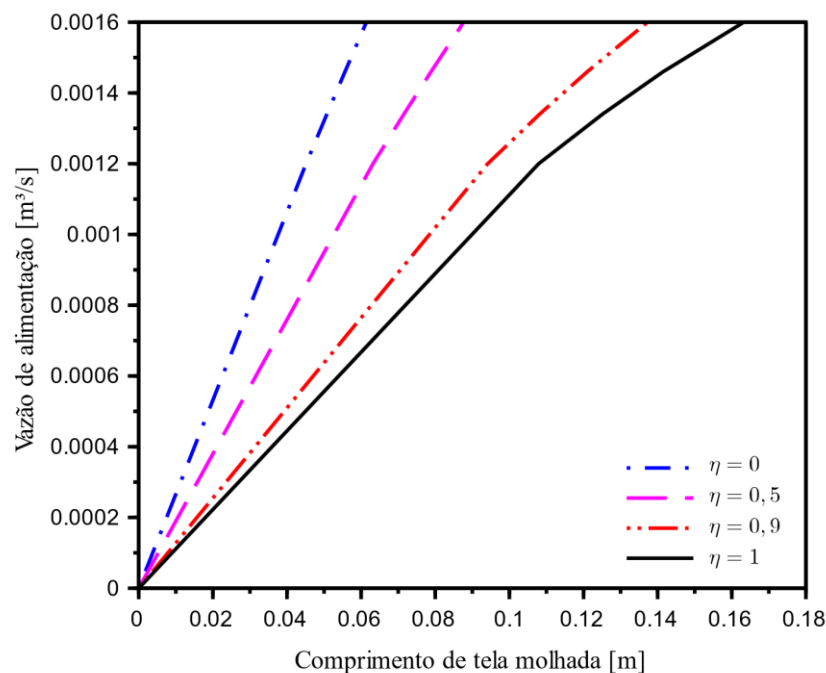


Figura 4.33 – Efeito do coeficiente de escoamento sobre a capacidade de processamento da peneira.

Na Tabela 4.10 encontram-se os resultados para as simulações dos efeitos de diferentes valores de  $\eta$  em um fluido à base de carbopol-941 e altura inicial de fluido  $h_0 = 0,05$  m. Como mostrado nos resultados para o fluido hipotético esse é um fator cuja influência sobre o comprimento de tela molhada é bastante significativo mesmo quando são comparados valores próximos uns aos outros ( $\eta = 0,95$  e  $\eta = 1$ ). Quando se diz que o coeficiente de escoamento possui um valor de  $\eta = 0,90$ , por exemplo, significa que a força normal de reação da tela ao escoamento do fluido é 90% do valor da força peso exercida pelo fluido durante o escoamento. Ou seja, a tela oferece alta resistência à passagem de fluido e, portanto, a extensão da tela percorrida pelo fluido será maior.

Tabela 4.10 – Efeito do coeficiente de escoamento para uma vazão de alimentação de  $3,16 \times 10^{-4}$  m³/s.

Fluido	$\theta$ (°)	Força-g	$\eta$	$L_{tm}$ (m)
Carbopol-941 (0,5%)	3	1	0,5	0,0859
			0,9	0,1426
			0,95	0,1586
			1	0,1843

Com o auxílio da Figura 4.34 observa-se o comportamento das variáveis resposta do modelo com a variação do coeficiente de escoamento. A altura da coluna de fluido quando  $\eta = 0,5$  apresenta pouca variação com o valor de  $L_{tm}$  obtido. Isso pode indicar que mesmo com a



tela oferecendo menor resistência à passagem de fluido o fato de que a aceleração transmitida à mesma através da força-g não é o suficiente para que seja rompida a resistência do fluido ao movimento da tela.

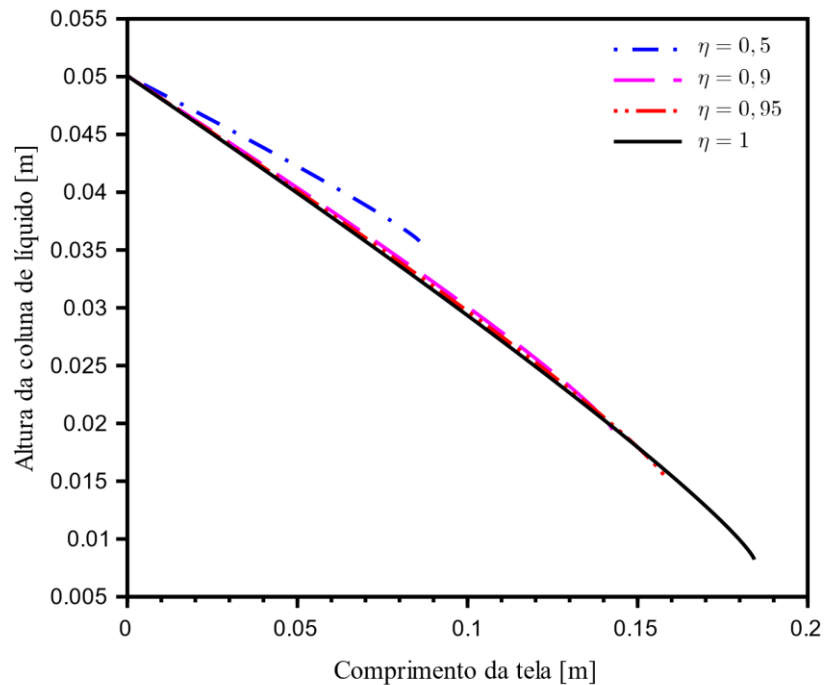


Figura 4.34 – Efeito do coeficiente de escoamento sobre a altura da coluna de fluido sobre a tela para um fluido a base de Carbopol-941.

Pelas Figuras 4.35 e 4.36 observa-se o comportamento velocidades do fluido em ambas as direções com a variação do coeficiente de escoamento. Pode-se observar para esse fluido o declínio bastante acentuado da velocidade ao longo da tela para  $\eta=0,5$  frente aos elevados valores representados pelas demais curvas. O reflexo disso está no comportamento da velocidade de passagem através da tela representada na Figura 4.36 em que o menor valor de  $\eta$  apresenta velocidade superior aos demais.

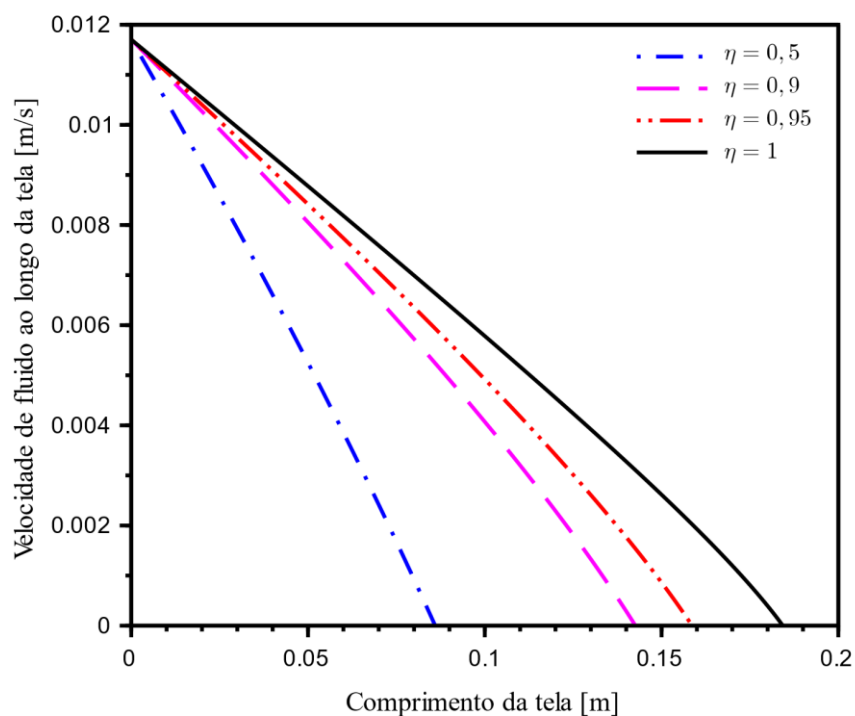


Figura 4.35 - Efeito do coeficiente de escoamento sobre a velocidade de fluido ao longo da tela para um fluido a base de Carbopol-941.

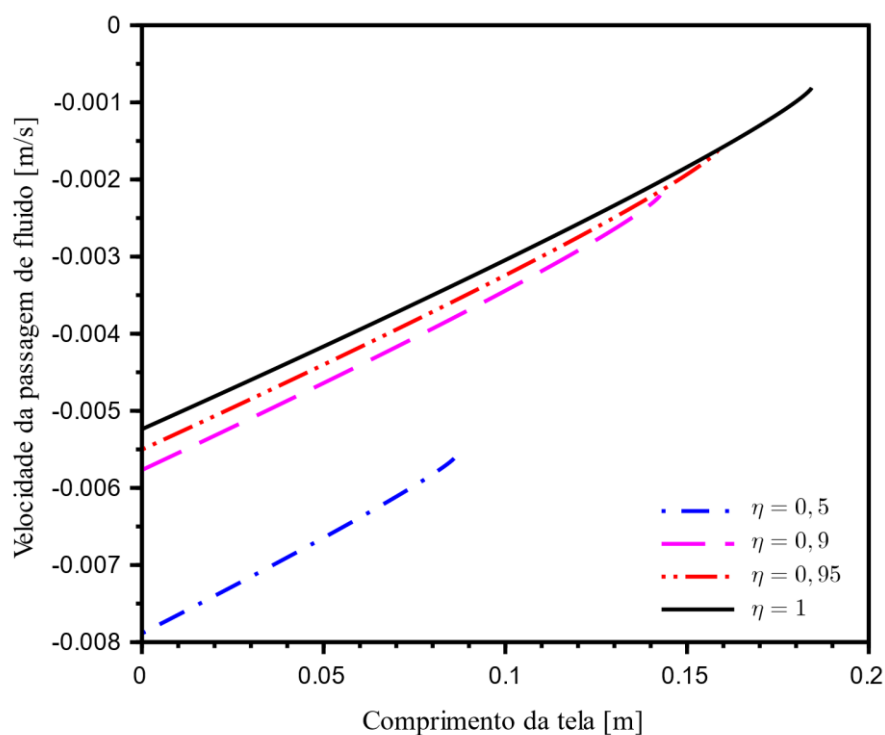


Figura 4.36 – Efeito do coeficiente de escoamento sobre a velocidade da passagem de fluido através da tela para um fluido a base de Carbopol-941.

Com base no exposto neste capítulo, os resultados podem ser sintetizados na forma da Tabela 4.11 em que são apresentados os efeitos que o aumento dos parâmetros do fluido (viscosidade plástica e tensão de escoamento) e da tela (ângulo de inclinação, força-g e

coeficiente de escoamento) causam sobre as variáveis altura de fluido sobre a tela, velocidades do fluido ao longo (direção x) e através da tela (direção y) e queda de pressão do fluido. Ainda são exibidos os efeitos sobre o comprimento de tela molhada ocupada pela lâmina de fluido e a capacidade de processamento da peneira. A simbologia utilizada representa situações de aumento ( $\uparrow$ ), redução ( $\downarrow$ ) ou insignificância de efeito ( $-$ ) de uma variável ou parâmetro.

Tabela 4.11 – Síntese dos resultados obtidos com a variação de parâmetros operacionais da peneira e do fluido.

	Viscosidade plástica, $\mu_0$	Tensão de escoamento, $\tau_0$	Ângulo de inclinação, $\theta$	Força-g	Coefficiente de escoamento, $\eta$
<b>Operação</b>	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$
<b>Altura, <math>h</math></b>	$-$	$-$	$\uparrow$	$\downarrow$	$-$
<b>Velocidade ao longo da tela, <math>v_x</math></b>	$\uparrow$	$-$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\uparrow$
<b>Velocidade através da tela, <math>v_y</math></b>	$\downarrow$	$-$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\downarrow$
<b>Queda de pressão, <math>\Delta P_{tela}</math></b>	$-$	$-$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\downarrow$
<b>Comprimento de tela molhada, <math>L_{tm}</math></b>	$\uparrow$	$-$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\uparrow$
<b>Capacidade de processamento, <math>Q_0</math></b>	$\downarrow$	$-$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\downarrow$

---

---

# CAPÍTULO 5

---

---

## CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvido um modelo fenomenológico para a descrição do processo de peneiramento vibratório de um fluido de perfuração caracterizado como um plástico de Bingham. O modelo considera parâmetros reológicos do fluido e parâmetros da tela utilizada como superfície de peneiramento para avaliar o escoamento do fluido através e ao longo da tela.

Uma revisão da literatura permitiu a proposição de uma correlação para a queda de pressão através de uma tela com resultados satisfatórios que foi utilizada como equação constituinte do modelo. A análise se deu para diferentes fluidos de base aquosa e não aquosa e o fluido à base de Carbopol-941 apresentou valores mais elevados de queda de pressão. Esse comportamento possivelmente foi causado pela sua alta viscosidade plástica ( $\mu_0 = 50,7 \times 10^{-3}$  Pa.s). No presente trabalho, a capacidade de processamento de uma peneira com tela quadrada de mesh 175x175 foi avaliada utilizando-se um fluido à base de bentonita e água.

A análise do efeito dos parâmetros se deu ao variar o parâmetro de interesse enquanto os demais foram mantidos constantes. Resultados mostraram que o aumento da viscosidade plástica ( $\mu_0$ ) do fluido afetou a capacidade de processamento da peneira no sentido de sua redução. Devido à resistência do fluido em escoar sua velocidade na direção y ( $v_y$ ) diminui conforme o fluido se torna mais viscoso e, conseqüentemente, a componente x da velocidade ( $v_x$ ) aumenta. A análise das informações obtidas por meio do modelo é compatível com o esperado, uma vez que a viscosidade representa a capacidade de um fluido em resistir ao escoamento. Em contrapartida, o modelo não se mostrou sensível a alterações na tensão limite de escoamento.

Por sua vez, os parâmetros operacionais apresentaram, de maneira geral, resultados mais pronunciados em relação as variáveis do modelo. Conforme o esperado, o aumento da força-g contribuiu para o aumento da componente y da velocidade do fluido ( $v_y$ ) e da

capacidade de processamento da peneira. Porém, após determinado limite na magnitude deste parâmetro (para os casos simulados este limite está situado entre força- $g = 3$  e força- $g = 5$ ) não foi exibido resultado significativo que justifique a continuidade no aumento da força- $g$ . Além disso, verificou-se que a força- $g$  aplicada à direção normal à tela (força- $g_y$ ) apresenta maior contribuição ao aumento na capacidade de processamento da peneira. Esta avaliação está de acordo com a literatura acerca do movimento de vibração em peneiras (HOBEROCK, 1980; ASME, 2005) em que é descrito que o movimento vibratório na direção ascendente (direção  $y$ ) tem o intuito de ajudar na passagem do fluido através da tela enquanto o movimento para a “frente” auxilia no transporte de sólidos de perfuração quando presentes.

O ângulo de inclinação se mostrou mais um parâmetro cujo incremento favoreceu o aumento da capacidade de processamento da peneira, de acordo com o modelo. Isso se deve ao fato que há um acréscimo na resistência do fluido em escoar devido à barreira representada pela superfície da tela. Além disso, a inclinação contribui para a formação de piscina no início da superfície da tela e essa coluna de fluido exerce uma pressão maior sobre as aberturas da tela auxiliando na passagem de fluido através da mesma.

Alterações no sentido de aumento do coeficiente de escoamento da tela prejudicam a capacidade de processamento do equipamento. Os resultados do modelo seguem em concordância com o esperado para este parâmetro que representa a resistência oferecida pela tela ao escoamento do fluido através da mesma. Portanto, incrementar valores de  $\eta$  implica em diminuir a velocidade de passagem do fluido através da tela e, como consequência, a capacidade de operação da peneira. Este parâmetro, em especial, deve ser explorado em trabalhos futuros para o desenvolvimento de uma correlação que seja capaz de predizer seus valores de forma acurada.

Como sugestão para trabalhos futuros são propostas:

- Estudo de correlações adequadas para o parâmetro  $\eta$ ;
- Realização de medidas experimentais para a definição dos parâmetros empíricos da correlação da queda de pressão;
- Desenvolvimento de um modelo considerando a presença de sólidos de perfuração junto ao fluido;
- Desenvolvimento do modelo matemático para o regime transiente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASE, B. *et al.* Criticality testing of drilling-fluid solids-control equipment. *SPE Drilling & Completion*, p. 148-157, 2013. <https://doi.org/10.2118/159894-PA>
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Rio de Janeiro: ANP, 2016.
- AMERICAN ASSOCIATION OF DRILLING ENGINEERS. Shale Shakers and Drilling Fluid Systems. EUA: Gulf Publishing Company, 1999. 335 p.
- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Drilling fluids processing handbook. EUA: Gulf Publishing Company, 2005. 666 p.
- AMNEUS, J. S. *TAPPI*, v. 48, 641 (1965).
- ARMOUR, J. C.; CANNON, J. N. Fluid flow through woven screens. *American Institute of Chemical Engineers Journal*, Cincinnati, v. 14, n. 3, p. 415-420, 1968.
- BICALHO, I. C. Estudo experimental e de simulação por CFD de escoamentos em seções anulares com excentricidade variável e obstrução parcial da coluna. 2015. 126 f. Tese - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2015.
- BIRD, R. B; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. Fenômenos de Transporte. 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2004, 838 p.
- BOURGOYNE JR., A. T.; MILLHEIM, K. K.; CHENEVERT, M. E.; YOUNG JR., F. S. Applied drilling engineering. 1ª ed. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 1986. 502 p.
- BRASIL. Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1988; e dá outras providências. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm)>. Acesso em: 20 de junho de 2017.
- BRASIL. Lei n. 9.478, de 6 de agosto de 1997. Dispões sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo e dá outras providências. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L9478.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9478.htm)>. Acesso em: 20 de junho de 2017.
- BRITISH PETROLEUM. BP *Statistical Review of World Energy*. Reino Unido, 2017.
- BRISCOE, B. J.; LUCKHAM, P. F.; REN, S. R. The settling of spheres in clay suspensions. *Powder Technology*, v.76, p. 165-174, 1993. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(05\)80024-5](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(05)80024-5)

- BUSSMEYER, E. C.; HENKES, J. A. Gestão ambiental na indústria do petróleo: sistema de gestão ambiental nas sondas de perfuração. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, Florianópolis, v. 3, n. 2, p. 396-462, 2015. <https://doi.org/10.19177/rgsa.v3e22014396-462>
- CAENN, R.; CHILLINGAR, G. V. Drilling fluids: State of the art. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 14, p. 221-230, 1996. [https://doi.org/10.1016/0920-4105\(95\)00051-8](https://doi.org/10.1016/0920-4105(95)00051-8)
- CHASE, G. G.; DACHAVIJIT, P. A correlation for yield stress fluid flow through packed beds. *Rheologica Acta*, v. 44, p. 495-501, 2005. <https://doi.org/10.1007/s00397-004-0430-3>
- COMMON WEAVE STYLES. Disponível em: <<http://www.wirecloth.com/common-weave-styles/>>. Acesso em: 25 de junho de 2017.
- CUTT, A. R. Shaker screen characterization through image analysis. In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 66, 1991, Dallas, SPE, p. 327-334. <https://doi.org/10.2118/22570-MS>
- DARLEY, H. C. H.; GRAY, G. R. Composition and properties of drilling and completion fluids. 5ª ed. Houston: Gulf Publishing Company, 1988. 643 p.
- DRILLING. Disponível em: <http://www.galpenenergia.com>. Acesso em: 18 de agosto de 2017.
- ERGUN, S. Fluid flow through packed columns. *Chemical Engineering Progress*, v. 48, n. 2, p. 89-94, 1952.
- FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. Introdução à mecânica dos fluidos. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010. 710 p.
- FREITAS, M. S. Avaliação do comportamento dinâmico de peneiramento vibratório utilizando modelos identificados. 2017. 119 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2017.
- GUERREIRO, F. S. Estudo experimental do peneiramento vibratório em batelada de suspensão diluída de rocha fosfática: determinação do teor de umidade de material retido, eficiência granulométrica e diâmetro de corte. 2015. 67 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2015.
- KIIJÄRVI, J. Darcy friction factor formulae in turbulent pipe flow. *Fluid Mechanics Paper*, 11 p., 2011.
- HINDMARSH, A. C. Odepack, a systematized collection of ODE solvers. *Scientific Computing*, p. 55-64, 1983.
- HOBEROCK, L. L. A study of vibratory screening of drilling fluids. *Journal of Petroleum Technology*, p. 1889-1902, 1980. <https://doi.org/10.2118/8226-PA>
- HOBEROCK, L. L. Curves are useful guide in finding fluid capacity limits for conventional shaker screens. *Oil & Gas Journal*, p. 89-100, 1982.

- HOBEROCK, L. L. Flow limits for unconventional shaker screens. *Oil & Gas Journal*, p. 92-101, 1982.
- HOBEROCK, L. L. Flow limits in vibrating screen separation of drilling fluids. *Filtration & Separation*, p. 109-114, 1982.
- HOBEROCK, L. L.; LAL, M. Solids-conveyance dynamics and shaker performance. *SPE Drilling Engineering*, p. 385-394, 1988.
- INGMANSON, W. L.; HAN, S. T.; WILDER, H. D.; MYERS JR., W. T. Resistance of wire screens to flow of water. *TAPPI*, v. 44, 47 (1961).
- INTERNATIONAL ASSOCIATION OF OIL & GAS PRODUCERS. Environmental aspects of the use and disposal of non aqueous drilling fluids associated with offshore oil & gas operations, 2003.
- LORENZI, A. Laminar, turbulent and transition flow in porous sintered media. *Meccanica*, p. 75-77, 1975. <https://doi.org/10.1007/BF02314743>
- MACDONALD, I. F.; EL-SAYED, M. S.; MOW, K.; DULLIEN, F. A. L. Flow through porous media – the Ergun equation revisited. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, v. 18, n. 3, p. 199-208, 1979. <https://doi.org/10.1021/i160071a001>
- MARIANO, J. B. Proposta de metodologia de avaliação integrada de riscos e impactos ambientais para estudos de avaliação ambiental estratégica do setor de petróleo e gás natural em áreas *offshore*. 2007. 569 p. Tese - Programa de Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007.
- MARQUES, M. D. Modelagem e Simulação da Formação de Torta em Peneiras Vibratórias. 2017. 121 f. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2017.
- RAJA, V.; CHASE, G; JONES, B. N; GEEHAN, T. Continuum model predicts shale shaker performance. *World Oil*, v. 232, n. 6, jun/2011. Disponível em: <<http://www.worldoil.com/>>. Acesso em: 23 de junho de 2017.
- RAJA, V. Shale shaker model and experimental validation. 2012. 274 f. Tese – Graduate Faculty of the University of Akron. Akron, 2012.
- SCHAFFEL, S. B. A questão ambiental na etapa de perfuração de poços marítimos de óleo e gás no Brasil. 2002. 126 f. Dissertação – Programa de Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2002.
- SCOTT, E. Automatic shaker control. In: IADC/SPE Drilling Conference, 2006, Miami, 5 p.
- THOMAS, J. E. *et al.* Fundamentos de engenharia de petróleo. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2001. 271 p.
- ZHU, W. Computer simulation and experiment for the conveyance motion of solid phased particle on sieve surface of well drilling shaker. *Journal of Machine Design*, n. 1, p. 50-52, 2005.



ZHU, W.; WU, W.; HAO, X.; WANG, H. A novel solution to sieving model for a drilling fluid shale shaker. *Indonesian Journal of Electrical Engineering*, v. 10, n. 6, p. 1357-1363, 2012.