

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO NUMÉRICO DO EFEITO DE OBSTRUÇÕES NA QUEDA DE PRESSÃO DO
ESCOAMENTO EM TUBULAÇÕES

por

Alysson Sehn

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, junho de 2015

ESTUDO NUMÉRICO DO EFEITO DE OBSTRUÇÕES NA QUEDA DE PRESSÃO DO
ESCOAMENTO EM TUBULAÇÕES

por

Alysson Sehn

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha

Comissão de Avaliação:

Prof^a. Dr^a. Adriane Prisco Petry

Prof. Dr. Paulo Arthur Beck

Prof^a. Dr^a. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 26, junho de 2015.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr Luiz Alberto Oliveira Rocha pela dedicação, apoio e transmissão de conhecimentos valiosos para a realização deste trabalho.

Ao meu pai, Luiz Airton Sehn Schneider, à minha mãe, Maria de Lourdes Schneider, à minha irmã, Tallita Sehn e demais familiares pelo suporte e paciência, tanto na vida pessoal quanto na profissional.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por me proporcionar conhecimento e alguns desafios fundamentais para meu crescimento pessoal e profissional.

Aos meus amigos, pela parceria e companheirismo.

SEHN, A. **Estudo Numérico do Efeito de Obstruções na Queda de Pressão do Escoamento em Tubulações**. 2015. 24 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RESUMO

Este trabalho estuda a perda de carga proveniente de obstrução em tubulações. As obstruções consideradas ocorrem normalmente devido à aglutinação de resíduos nas paredes da tubulação. A geometria destas obstruções, bem como o regime do escoamento e as propriedades físicas do fluido que escoam, interferem intensamente na perda de carga. Portanto, investiga-se o efeito destes parâmetros na perda de carga. Ou seja, a forma geométrica das obstruções é variada, desde seções longitudinais circulares (excentricidade igual a um) até seções elípticas com diversas excentricidades, mantendo-se os demais parâmetros constantes. Posteriormente estuda-se a influência das forças de inércia e viscosas do fluido na perda de carga, através da variação do número de Reynolds do escoamento. A fim de ampliar o campo de aplicação destes resultados são estudados escoamentos onde o fluido é considerado newtoniano e também escoamentos com fluidos não-newtonianos. As equações matemáticas que descrevem o comportamento dinâmico destes escoamentos são resolvidas numericamente utilizando o *software* comercial ANSYS. Os resultados indicam que há um aumento significativo da perda de carga para excentricidades acima de 0,65. Para excentricidades inferiores a 0,65 a queda de pressão é menos significativa. Como exemplos de aplicação deste trabalho pode-se citar o dimensionamento de bombas na indústria do petróleo, na indústria alimentícia, dentre outras.

PALAVRAS-CHAVE: perda de carga, geometria das obstruções, método numérico, fluido não-newtoniano.

SEHN, A. **Numerical Study of the Effect of Obstructions on the Pressure Drop of the Flow in Pipes**. 2015. 24 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

ABSTRACT

This paper studies the pressure drop due to obstructions in pipes. The considered obstructions typically occur because the assemblage of wastes on the walls of pipe. The geometry of these obstructions, the flow regime and physical properties of the fluid which flows intensively interfere with the pressure drop. Therefore, it is investigated the effect of these parameters on the pressure loss. That is, the geometric shape of obstructions is varied, from circular longitudinal sections (eccentricity equal to one) to elliptical sections with different eccentricities, keeping the other parameters constant. Thereafter it is studied the influence of inertial forces and viscous fluid in the pressure loss, by varying the Reynolds number of the flow. In order to enlarge the scope of these results are studied flows where the fluid is considered Newtonian fluids and also with non-Newtonian fluids. The mathematical equations describing the dynamic behavior of these flows are solved numerically using the commercial *software* ANSYS. The results indicate that there is a significant increase in pressure drop up to eccentricity of 0.65. For eccentricities smaller than 0.65 the pressure drop is less significant. Examples of application of this work can be found in the design of pumps in the petroleum industry, the food industry, among others.

KEYWORDS: pressure drop, geometry of obstructions, numerical method, non-newtonian fluid

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
2.1 Objetivos específicos	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
4.1. Equação diferencial da conservação de massa em coordenadas cartesianas.....	3
4.2. Equação diferencial da quantidade de movimento	4
4.3. Fluidos newtonianos: Equação de Navier-Stokes.....	5
4.4. Fluidos não newtonianos – modelo <i>power-law</i> ou modelo de Ostwald de Waele	6
4.5. Modelagem clássica da turbulência (RANS).....	6
4.6. Modelo de turbulência <i>k-ε</i>	7
5. METODOLOGIA.....	7
5.1. Parâmetros da simulação	8
5.2. Solução analítica	8
5.2.1. Solução analítica para fluidos newtonianos	8
5.2.2. Solução analítica para fluidos não newtonianos	9
5.3. Soluções obtidas numericamente	10
5.3.1. Parâmetros de entrada	10
5.3.2. Malha computacional	11
5.3.3. Resultados e discussões	12
6. CONCLUSÕES.....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
ANEXO(S)	16
ANEXO 1 – MALHAS UTILIZADAS.....	16
ANEXO 2 – TABELAS DE RESULTADOS	17
APÊNDICE(S)	18
APÊNDICE 1 – DIAGRAMA DE MOODY.....	18

1. INTRODUÇÃO

A motivação para este estudo deu-se em razão da obstrução que ocorre em dutos de petróleo por objetos de diferentes geometrias. O entupimento dos dutos, com o consequente aumento da resistência ao escoamento do óleo, é um sério problema que é enfrentado pela indústria. Ele pode ser causado por fatores como a parafinação e o congelamento em dutos submarinos, o que pode causar interrupções na extração do petróleo, causando aumento nos custos e no tempo de produção, assim como um aumento nos custos de remediação. Um aumento na resistência do escoamento pode fazer com que as bombas funcionem de maneira ineficiente ou sofram danos. Particularmente, o aumento da resistência ao escoamento devido às obstruções implica na necessidade do engenheiro de superestimar a potência das bombas empregadas. O correto dimensionamento das perdas de pressão, decorrentes da geometria das obstruções presentes, permite aos engenheiros dimensionar corretamente as bombas e, conseqüentemente, aumentar a eficiência energética desses equipamentos.

É proposto o estudo numérico do escoamento monofásico de óleo diesel e outros fluidos derivados ou não do petróleo, sujeitos a obstruções no duto. O escoamento é incompressível, em regime permanente e possui propriedades constantes. Foram estudadas as diversas formas de obstrução e qual o efeito de suas formas geométricas na resistência ao escoamento, isto é, a razão entre a queda de pressão e a vazão. Como a maioria dos fluidos derivados do petróleo são não Newtonianos, deve ser feito um estudo prévio a respeito das propriedades dos fluidos utilizados e deve-se levar em conta modelos de turbulência para uma melhor aproximação dos resultados.

Optou-se pela utilização de fluidos com viscosidades variadas, desde os mais comuns, até aqueles com viscosidades extremamente elevadas. Mesmo que não ocorra o escoamento real destes últimos em alguma geometria semelhante à estudada, optou-se pela sua utilização para abranger um campo maior de dados no que diz respeito à viscosidade dos fluidos estudados.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo estudar a queda de pressão quando escoamentos em dutos são obstruídos por objetos de diferentes geometrias.

2.1 Objetivos específicos

- Desenvolver um modelo numérico para calcular a queda de pressão em dutos com obstrução de forma elíptica;
- Verificar a acurácia do método desenvolvido;
- Empregar o programa desenvolvido para calcular a queda de pressão em escoamentos para diversos números de Reynolds utilizando fluidos Newtonianos e Não-Newtonianos em função da excentricidade da elipse.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Como descrito por Ribeiro et al, 1997, um dos problemas mais sérios encontrados na extração de petróleo de reservatórios *offshore* é a obstrução das tubulações que conduzem óleo do fundo do oceano até a plataforma flutuante. O óleo entra na tubulação entre 60 e 70°C, e por causa de a água do oceano ser mais fria (4°C em águas profundas), o óleo resfria ao longo do seu trajeto pela tubulação até a plataforma. Por conseqüência, hidrocarbonetos pesados precipitam no óleo enquanto ele escoava pela tubulação, uma vez que a solubilidade diminui conforme a temperatura diminui. Os depósitos de parafina precipitam sobre a parede interna do tubo, formando uma camada sólida que restringe a passagem do óleo e eventualmente reduz drasticamente o fluxo.

Yang e Mao, 2003, realizaram estudos semelhantes e concluíram que alguns exemplos numéricos típicos incluindo fluidos newtonianos, fluidos *power-law*, modelo de Carreau-Bird e fluidos de Oldroyd-B passando através de um obstáculo circular, triangular ou trapezoidal fixados na parede externa de um tubo reto foram simulados com sucesso num sistema de coordenadas bi dimensional e axi simétrico. Estes testes numéricos indicam que, o que o autor chamou de método do espelho, é um método simples e efetivo para a simulação de fluidos viscosos com superfícies sólidas irregulares.

De acordo com Chhabra e Richardson, 2008, um fluido não newtoniano é aquele cuja curva (tensão de cisalhamento por taxa de cisalhamento) é não-linear ou não passa pela origem, isto é, onde a viscosidade aparente, tensão de cisalhamento dividido por taxa de cisalhamento, não é constante a uma dada temperatura e pressão, mas é dependente das condições do escoamento, tais como geometria do escoamento, taxa de cisalhamento, etc, e por vezes até mesmo sobre a história cinemática do elemento fluido em questão. Esses materiais podem ser convenientemente agrupados em três classes gerais:

- 1) Fluidos onde a taxa de cisalhamento em qualquer ponto é determinada unicamente pelo valor da tensão de cisalhamento neste ponto instantaneamente; estes fluidos são comumente conhecidos como 'independentes do tempo', 'puramente viscosos', 'inelásticos' ou 'fluidos newtonianos generalizados';
- 2) Os fluidos mais complexos em que a relação entre tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento depende, além disso, da duração do cisalhamento e de sua história cinemática, são chamados de 'fluidos dependentes do tempo', e finalmente,
- 3) Substâncias exibindo características de ambos, fluidos ideais e sólidos elásticos e demonstrando recuperação elástica parcial após deformação; estes são categorizados como 'fluidos visco elásticos'.

Esta classificação é arbitrária e a maioria dos materiais reais exibe uma combinação de dois ou até todos os três tipos de características não newtonianas. No entanto, geralmente é possível identificar a característica não newtoniana dominante e tomá-la como base para os cálculos subsequentes.

Através dos estudos de Trinh, 2009, verificou-se que se juntando todos os fatores de atrito estudados por ele, expressos em termos da tensão de cisalhamento instantânea na parede plotados em uma mesma curva, os mecanismos de turbulência são os mesmos, tanto para fluidos newtonianos quanto para fluidos regidos pela power law. De fato, o mesmo exercício pode ser repetido para outros modelos de fluidos, como o modelo do plástico de Bingham e o modelo de Herschel-Bulkley, e a observação pode ser geralmente aplicada para todos os fluidos independentes do tempo.

De acordo com How et al, 1988, sabe-se que a queda de pressão para um determinado fluxo varia linearmente com a distância em um tubo cilíndrico uniforme. Já para tubos cônicos, é visto que a queda de pressão aumenta de forma não linear devido à redução da seção transversal com a distância. Quanto maior o ângulo do cone, mais pronunciada é a não linearidade.

Do trabalho de Manica, 2003, sabe-se que os fluidos poliméricos apresentam características viscosas e elásticas, sendo chamados de fluidos viscoelásticos. Este é o comportamento mais marcante dos fluidos poliméricos, podendo ser observado facilmente em testes experimentais. Outra característica reológica de fluidos poliméricos é possuir viscosidade dependente da deformação, sendo chamados pseudoplásticos, onde a viscosidade efetiva diminui com o aumento da taxa de deformação. Além disso, esses fluidos apresentam diferenças de tensões normais em fluxos cisalhantes, em decorrência da viscoelasticidade.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentadas brevemente as equações resolvidas pelo solver do *Fluent*. Dentre elas incluem-se as equações clássicas da mecânica dos fluidos e o modelo de turbulência utilizado para as simulações.

4.1. Equação diferencial da conservação de massa em coordenadas cartesianas

De acordo com Fox et al, 2010, o volume de controle escolhido para obtenção da equação diferencial da continuidade é um cubo infinitesimal com lados de comprimento dx , dy , dz , conforme indicado na figura 4.1. A massa específica no centro, O , do volume de controle é admitida como sendo ρ e a velocidade nesse ponto é admitida como $\vec{V} = \hat{i}u + \hat{j}v + \hat{k}w$.

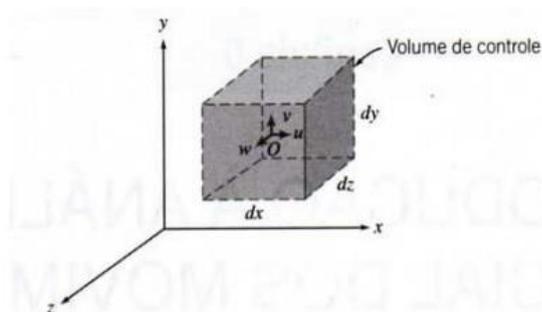


Figura 4.1: Volume de controle diferencial em coordenadas retangulares.

Para avaliar as propriedades em cada uma das seis faces, foi usada uma expansão em série de Taylor em torno do ponto O .

O enunciado da conservação de massa diz que a taxa líquida de fluxo de massa para fora da superfície de controle, mais a taxa de variação de massa dentro do volume de controle deve ser igual à zero. Para determinar o primeiro termo desta equação, devemos avaliar $\int_{SC} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A}$, ou seja, a vazão mássica, em cada uma das seis faces da superfície de controle. Admitindo-se que as componentes das velocidades em cada face são positivas e adotando a convenção de que a normal da área é positiva para fora de cada face, temos a taxa líquida de fluxo de massa para fora do volume de controle como a soma da taxa de fluxo de massa em cada superfície, ou seja

$$\left[\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} \right] dx dy dz \quad (4.1)$$

A massa dentro do volume de controle, em qualquer instante, é o produto da massa por unidade de volume, ρ , pelo volume, $dx dy dz$. Assim, a taxa de variação de massa dentro do volume de controle é dada por

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz \quad (4.2)$$

Então, a equação diferencial para conservação de massa em coordenadas retangulares é dada por

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (4.3)$$

4.2. Equação diferencial da quantidade de movimento

Aplicando-se a segunda lei de Newton a uma partícula fluida de massa infinitesimal dm , obtemos

$$d\vec{F} = dm \frac{d\vec{V}}{dt} \quad (4.4)$$

Sabendo que

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = u \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + w \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} + \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = \vec{a}_p \quad (4.5)$$

Chega-se em

$$d\vec{F} = dm \left[u \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + w \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} + \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} \right] \quad (4.6)$$

Lembrando-se de que forças que atuam sobre um elemento fluido podem ser classificadas como forças de campo e forças de superfície.

Consideremos a componente x da força atuando sobre um elemento diferencial de massa dm e volume $dV = dx dy dz$. Somente aquelas tensões que atuam na direção x darão origem a forças de superfície na direção x . Se as tensões no centro do elemento diferencial forem tomadas como σ_{xx} , τ_{yx} , τ_{zx} , então as tensões atuando na direção x em cada face do elemento (obtidas por uma expansão por série de Taylor em torno do centro do elemento) como na figura abaixo.

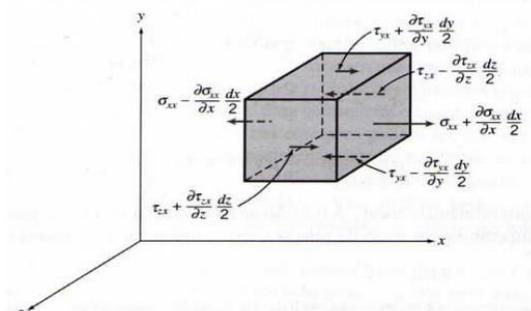


Figura 4.2: Tensões sobre um elemento de fluido na direção x .

Para obter a força de superfície resultante na direção x , dF_{sx} , devemos somar as forças nessa direção. Após simplificar, chegamos ao seguinte resultado.

$$dF_{sx} = \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) dx dy dz \quad (4.7)$$

Quando a força de gravidade é a única força de corpo atuante, a força por unidade de massa é igual a \vec{g} . A força resultante nas direções x , y e z , dF_x , dF_y e dF_z é dada por

$$dF_x = dF_{B_x} + dF_{S_x} = \left(\rho g_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) dx dy dz \quad (4.8a)$$

$$dF_y = dF_{B_y} + dF_{S_y} = \left(\rho g_y + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) dx dy dz \quad (4.8b)$$

$$dF_z = dF_{B_z} + dF_{S_z} = \left(\rho g_z + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \right) dx dy dz \quad (4.8c)$$

Substituindo-se as expressões deduzidas acima nas componentes x, y e z da força, obteremos as equações diferenciais do movimento.

$$\rho g_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (4.9a)$$

$$\rho g_y + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (4.9b)$$

$$\rho g_z + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (4.9c)$$

Antes que estas equações possam ser usadas na solução para u, v e w, expressões adequadas para as tensões devem ser obtidas em termos dos campos de velocidade e pressão.

4.3. Fluidos newtonianos: Equação de Navier-Stokes

Para um fluido newtoniano, a tensão viscosa é diretamente proporcional à taxa de deformação por cisalhamento (taxa de deformação angular). É sabido que, para um escoamento newtoniano, unidimensional e laminar, a tensão de cisalhamento é proporcional à taxa de deformação angular, $\tau_{yx} = \mu du/dy$. Para escoamento tridimensional, as tensões podem ser expressas em termos de gradientes de velocidade e de propriedades dos fluidos, em coordenadas retangulares, como segue:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (4.10a)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (4.10b)$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (4.10c)$$

$$\sigma_{xx} = -p - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (4.11a)$$

$$\sigma_{yy} = -p - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial y}{\partial y} \quad (4.11b)$$

$$\sigma_{zz} = -p - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (4.11c)$$

Onde p é a pressão termodinâmica local e μ é a viscosidade dinâmica. A pressão termodinâmica está relacionada com a massa específica e com a temperatura por meio das relações termodinâmicas usualmente chamadas de equações de estado.

Introduzindo essas expressões para as tensões nas equações diferenciais do movimento, obtemos as conhecidas equações de Navier-Stokes:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] \quad (4.12a)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] \quad (4.12b)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) \right] \quad (4.12c)$$

4.4. Fluidos não newtonianos – modelo *power-law* ou modelo de Ostwald de Waele

A relação entre a tensão de cisalhamento, τ_{yx} , e a taxa de cisalhamento, $\dot{\gamma}_{yx}$, (plotado em um gráfico com ambos os eixos em escala logarítmica) para um fluido pseudoplástico pode ser frequentemente aproximada por uma linha reta ao longo de uma gama limitada da taxa ou tensão de cisalhamento. Para esta parte da curva, uma expressão da seguinte forma pode ser aplicada

$$\tau_{yx} = m(\dot{\gamma}_{yx})^n \quad (4.13)$$

então, a viscosidade aparente para os chamados fluidos *power-law* pode ser dada por:

$$\mu = \frac{\tau_{yx}}{\dot{\gamma}_{yx}} = m(\dot{\gamma}_{yx})^{n-1} \quad (4.14)$$

Para $n < 1$, o fluido exibe propriedades dilatantes
 $n = 1$, o fluido demonstra comportamento newtoniano
 $n > 1$, o fluido demonstra comportamento pseudoplástico

Nestas equações, m e n são dois parâmetros empíricos de ajuste de curvas e são conhecidos como coeficiente de consistência do fluido e índice de comportamento do escoamento, respectivamente. Para um fluido dilatante, o índice pode ter qualquer valor entre 0 e 1. Quanto menor o valor de n , maior o grau de dilatação. Para um fluido pseudoplástico, o índice n será maior que a unidade. Quando $n = 1$, a equação descreve o comportamento de fluidos newtonianos.

4.5. Modelagem clássica da turbulência (RANS)

Devido às condições de contorno do problema, grande parte dos escoamentos ocorre em regime turbulento, sendo assim, o *software* de simulação necessita de uma maneira para resolver estes escoamentos. Neste trabalho, será utilizada a modelagem clássica da

turbulência (RANS) (ver Ferraz et al., 2014), que consiste na ideia de se realizar uma média temporal sobre as equações de conservação que modelam os escoamentos, sendo as variáveis do problema (velocidade e pressão) decompostas em uma parcela média e outra flutuante no tempo. Nesse processo são originadas novas incógnitas (tensões de Reynolds para a equação de conservação de quantidade de movimento) que contribuem para a predição do campo médio do escoamento. Contudo, o número de equações de conservação permanece o mesmo e passa-se a ter mais incógnitas do que equações, dando origem ao problema do fechamento. Essa metodologia tem sido satisfatória na predição de escoamentos internos. Outro fator que merece destaque é o seu amplo emprego na estimativa de parâmetros médios de escoamentos turbulentos e em problemas práticos de engenharia, visto que essa modelagem requer o menor esforço computacional entre as existentes.

Por uma questão de simplicidade, neste estudo, serão apenas apresentadas as equações empregadas para resolver o problema de fechamento no modelo de turbulência utilizado para as simulações.

4.6. Modelo de turbulência k - ε

Para o presente estudo foi utilizado o modelo k - ε (ver Ferraz et al., 2014), no qual a viscosidade turbulenta, v_t , é dada por

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.15)$$

sendo $C_\mu = 0,09$.

A equação da energia cinética da turbulência (k) é dada por

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{v}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \varepsilon \quad (4.16)$$

E a equação da dissipação de ε , é dada por:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{v}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4.17)$$

sendo $C_{\varepsilon 1} = 1,44$, $C_{\varepsilon 2} = 1,92$, $\sigma_k = 1,0$ e $\sigma_\varepsilon = 1,3$ os coeficientes utilizados para resolver o problema de fechamento.

O primeiro termo, que corresponde ao lado direito da equação (4.16) é o de produção de energia cinética da turbulência, já o segundo termo é o transporte de k por difusão, e o último termo é a taxa de dissipação viscosa de k . Na equação (4.17) os três termos do lado direito são, respectivamente, os mecanismos de difusão, produção e destruição de ε .

O modelo k - ε na sua formulação standard, a qual foi utilizada durante as simulações, não é aplicável a fluidos não newtonianos, já que o termo τ_{ij} na equação (4.16) assume a linearidade entre taxa de deformação e as tensões viscosas, essa última modelada pela hipótese de Boussinesq.

5. METODOLOGIA

Os modelos matemáticos apresentados na seção anterior são resolvidos numericamente utilizando o *software* Ansys. Para a validação das malhas, os resultados numéricos são comparados com os resultados analíticos sem a presença de obstáculos. A seguir, o método numérico desenvolvido é utilizado para calcular a queda de pressão no tubo

com obstáculos para diversos números de Reynolds utilizando-se fluidos Newtonianos e Não-Newtonianos.

5.1. Parâmetros da simulação

Com o intuito de diminuir o tempo computacional, as simulações foram realizadas com modelos axi-simétricos em relação ao eixo longitudinal. O obstáculo utilizado para o estudo possui a forma de meia elipse, onde a é o semieixo maior e b o semieixo menor e a excentricidade (e) é dada pela razão b/a . A área da seção longitudinal do obstáculo foi mantida constante e igual a $0,098\text{m}^2$. O duto possui um metro de diâmetro por dez metros de comprimento. O escoamento é incompressível, turbulento, regime permanente e isotérmico. A velocidade de entrada é de 3m/s e as condições de contorno de impermeabilidade e não deslizamento foram utilizadas na parede do tubo. Foi utilizada malha não estruturada durante as simulações. O material da tubulação é alumínio. A figura abaixo mostra as condições de contorno utilizadas para as simulações.

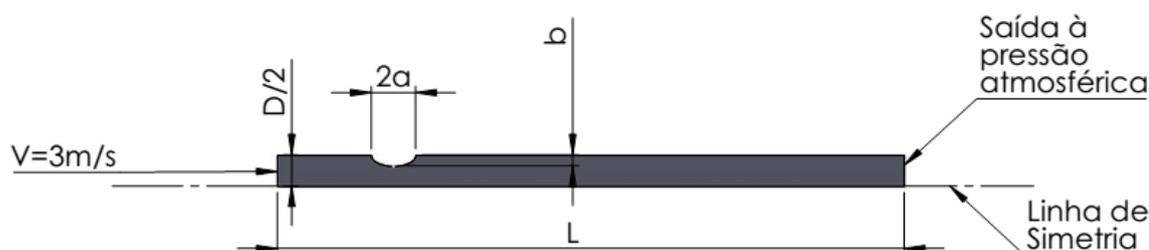


Figura 5.1: Condições de contorno das simulações.

5.2. Solução analítica

Nesta seção é calculada a perda de carga para um escoamento de fluidos newtonianos e não newtonianos, utilizando-se a *power-law*, de forma analítica, com o intuito de comparar e validar os resultados da simulação. Será feito para um tubo liso, sem obstáculos, com um dos fluidos estudados, e este raciocínio pode ser estendido para as outras simulações. Para todos os fluidos *power-law*, o escoamento é laminar, e para todos os fluidos newtonianos, o escoamento é turbulento.

5.2.1. Solução analítica para fluidos newtonianos

Aqui o fluido escolhido foi o diesel, considerando-se as propriedades geométricas da tubulação e as características do fluido, chega-se ao seguinte resultado, para escoamento turbulento, visto que $Re = 912500$, e que para escoamento laminar devemos ter $Re < 2100$.

Dados:

$$V=3 \text{ m/s}$$

$$\rho=730 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu=0,0024 \text{ Pa s}$$

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = 912500 \quad (5.1)$$

Do diagrama de Moody, com $Re = 912500$, determina-se o fator de atrito, $f = 0,018$, e após isso as perdas de carga dinâmicas, h_l . Foram desconsideradas as perdas de carga locais.

$$h_l = f \frac{L V^2}{D} = 0,81 \quad (5.2)$$

A partir destes resultados, com $p_2 = 0 \text{ Pa}$, encontra-se a perda de carga entre os dois pontos, que neste caso é igual a 591,3Pa

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho} = \frac{\Delta p}{\rho} = h_l \quad (5.3a)$$

$$p_1 = 591,3 \text{ Pa} \quad (5.3b)$$

O valor obtido nas simulações para duas dimensões de malha, a fim de validar os resultados seguem na tabela abaixo.

Tabela 5.1: Comparação entre resultados numéricos e analíticos para o diesel.

Malha	Nós	Elementos	Resultado	Diferença para o resultado analítico
1	244	180	657,793 Pa	10,11%
2	405	320	634,23 Pa	6,77%

Dada a pequena diferença entre as simulações e o resultado analítico, considera-se o resultado como satisfatório e as simulações para fluidos newtonianos estão suficientemente próximas da realidade.

5.2.2. Solução analítica para fluidos não newtonianos

Para este caso, utilizou-se o polipropileno. Primeiro nos certificamos de que o escoamento é laminar. Para isso, deve-se determinar o número de Reynolds crítico, Re_{crit} , e compará-lo com o número de Reynolds para a *power-law*, conforme descrito em Chhabra e Richardson, 2008.

$$Re_{crit} = \frac{6464n}{(3n + 1)^2} (2 + n)^{(2+n)/(1+n)} \quad (5.4a)$$

Onde $n = 0,4$

Temos, então:

$$Re_{crit} = 2396,11 \quad (5.4b)$$

Utilizando a formulação para determinar o número de Reynolds para a *power-law*, Re_{PL} :

$$Re_{PL} = \frac{\rho V^{2-n'} D^{n'}}{8^{n'-1} m'} \quad (5.5a)$$

$$Re_{PL} = 2,24 \quad (5.5b)$$

Onde,

$$n' = n \quad (5.6a)$$

$$m' = m \left(\frac{3n + 1}{4n} \right)^n \quad (5.6b)$$

logo, o escoamento é laminar.

Após isso, é necessário determinar o valor de f , ou o fator de atrito:

$$f = \frac{16}{Re_{PL}} \quad (5.7a)$$

$$f = 7,13 \quad (5.7b)$$

Logo, para o escoamento em estudo, obtém-se, com $L = 10m$, $D = 1m$, $V = 3m/s$ e $\rho = 946kg/m^3$:

$$\left(\frac{\Delta p}{L}\right) = \frac{2f\rho V^2}{D} \quad (5.8a)$$

$$\Delta P = 1214861,67 Pa \quad (5.8b)$$

O valor obtido nas simulações para duas dimensões de malha, a fim de validar os resultados seguem na tabela abaixo.

Tabela 5.2: Comparação entre resultados numéricos e analíticos para o polipropileno.

Malha	Nós	Elementos	Resultado	Diferença para o resultado analítico
1	244	180	$1,17 \cdot 10^6 Pa$	3,69%
2	405	320	$1,21 \cdot 10^6 Pa$	0,04%

Como na simulação obteve-se $1,21 \cdot 10^6 Pa$, chegamos a 3,69% e 0,04% de diferença, o que dá uma aproximação muito boa entre os resultados.

5.3. Soluções obtidas numericamente

5.3.1. Parâmetros de entrada

Antes de ser iniciada a simulação, devem ser levantados os parâmetros de entrada do escoamento. Necessita-se saber o tipo de escoamento, laminar ou turbulento, o tipo de fluido, newtoniano ou *power-law*, os dados de entrada, no caso, a velocidade de 3m/s, a pressão atmosférica na saída da tubulação, a condição de não deslizamento na parede e a simetria em relação ao eixo longitudinal. As tabelas a seguir resumem os parâmetros utilizados.

Tabela 5.3: Dados fluidos newtonianos

	Fluidos newtonianos			
	Água	Diesel	Etilenoglicol	Glicerina
ρ [kg/m ³]	998,2	730	1113,2	1260
μ [Pa s]	0,001003	0,0024	0,02	1,5
Re	2985643	912500	116980	2520
Re _{crit}	2100	2100	2100	2100
Tipo de Escoamento	Turbulento	Turbulento	Turbulento	Turbulento

Tabela 5.4: Dados fluidos *power-law*

	Fluidos <i>power-law</i>			
	Nylon	Acrílico	Polipropileno	Policarbonato
ρ [kg/m ³]	1140	1180	946	1200
m [Pa s ⁿ]	1800	25000	7500	1000
n	0,65	0,25	0,4	0,65
T [K]	493	493	473	553
Re_{pl}	5,32	1,33	2,24	10,1
Re_{crit}	2309,56	2271,4	2396,11	2309,56
Tipo de Escoamento	Laminar	Laminar	Laminar	Laminar

5.3.2. Malha computacional

Devido à relativa simplicidade das geometrias de obstrução estudadas, optou-se por não realizar um estudo detalhado da malha, pois a precisão obtida com malha *default* já atendeu os objetivos do trabalho. Assim, para cada escoamento, a malha utilizada foi a oferecida por *default* pelo *software*, com o cuidado de realizar seu refinamento por um fator de três. Os elementos utilizados foram hexaédricos e os tamanhos das malhas constam na tabela abaixo.

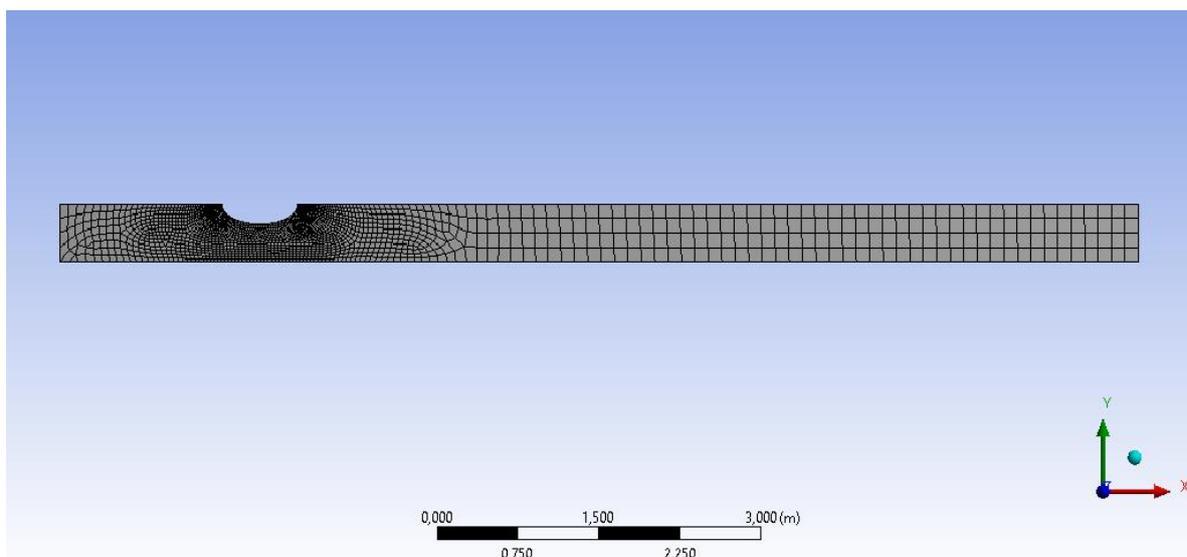


Figura 5.2: Exemplo de malha utilizada.

Tabela 5.5: Dimensões das malhas utilizadas.

Malha Computacional		
	Nós	Elementos
e=0	405	320
e=0,1	6444	6191
e=0,2	5166	4937
e=0,3	3621	3411
e=0,4	3115	2965
e=0,45	2598	2429
e=0,5	2369	2200
e=0,55	2125	1956
e=0,6	1958	1793
e=0,7	1725	1568
e=0,8	1583	1434
e=0,9	1445	1296
e=1	1358	1217

5.3.3. Resultados e discussões

Após o ajuste de cada parâmetro, foram obtidos os resultados de queda de pressão do escoamento em função da excentricidade do obstáculo localizado na tubulação.

Como se pode perceber nas figuras abaixo, há uma tendência clara no comportamento dos gráficos de queda de pressão por excentricidade. Os fluidos newtonianos e os fluidos *power-law* se comportaram de maneira semelhante, dentro do seu próprio tipo. Percebe-se que a queda de pressão aumenta consideravelmente mais rápido para excentricidades superiores a 0,65, principalmente para fluidos newtonianos, onde esse efeito é mais pronunciado. Para fluidos *power-law*, com exceção do acrílico, o mesmo efeito também ocorreu, porém de maneira menos significativa. Ainda pode-se perceber, para fluidos newtonianos, que o gráfico se divide em três patamares distintos, sendo as excentricidades de 0,4 e 0,65 os pontos que fazem esta divisão. O fator mais impactante no aumento da queda de pressão foi a alteração da dimensão do semieixo menor do obstáculo em forma de elipse, ou seja, a dimensão [b].

Estes resultados se mostram bastante interessante para aplicações cotidianas, principalmente no que se refere à indústria petroquímica e de alimentos, pois muitos dos fluidos utilizados por estas, deixam resíduos nas paredes das tubulações, o que pode gerar aumento significativo na pressão necessária para manter o escoamento e conseqüentemente o bom funcionamento do processo. O correto dimensionamento destas perdas de pressão pode evitar paradas de manutenção desnecessárias.

Também existe a possibilidade da aplicação de resultados semelhantes em outras áreas de estudo, como a indústria de cosméticos, na qual grande parte dos fluidos são não newtonianos e até na medicina, no que se refere ao escoamento de sangue em artérias e veias obstruídas por enfermidades, como a arteriosclerose, trombose ou estenose arterial ou venosa ou tromboembolismo pulmonar.

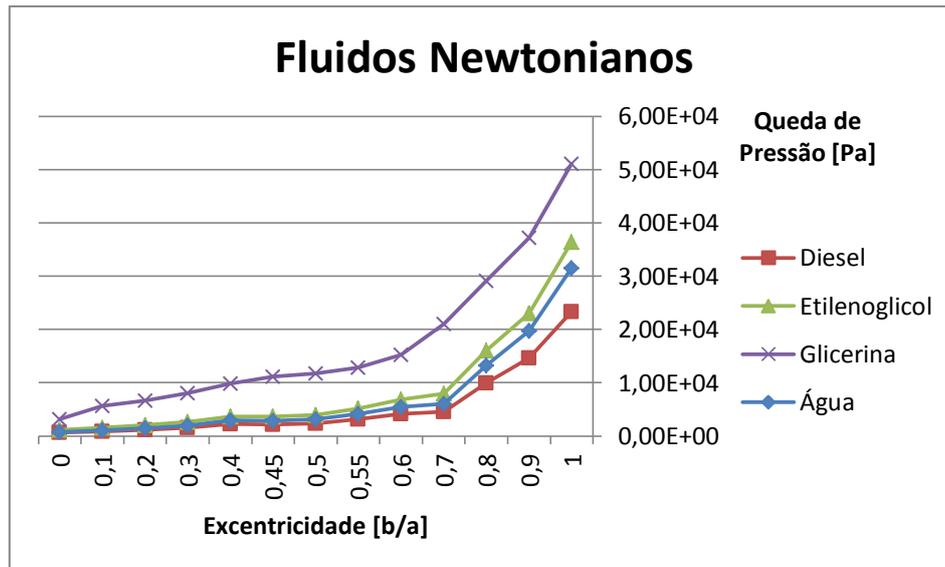


Figura 5.3: Fluidos newtonianos

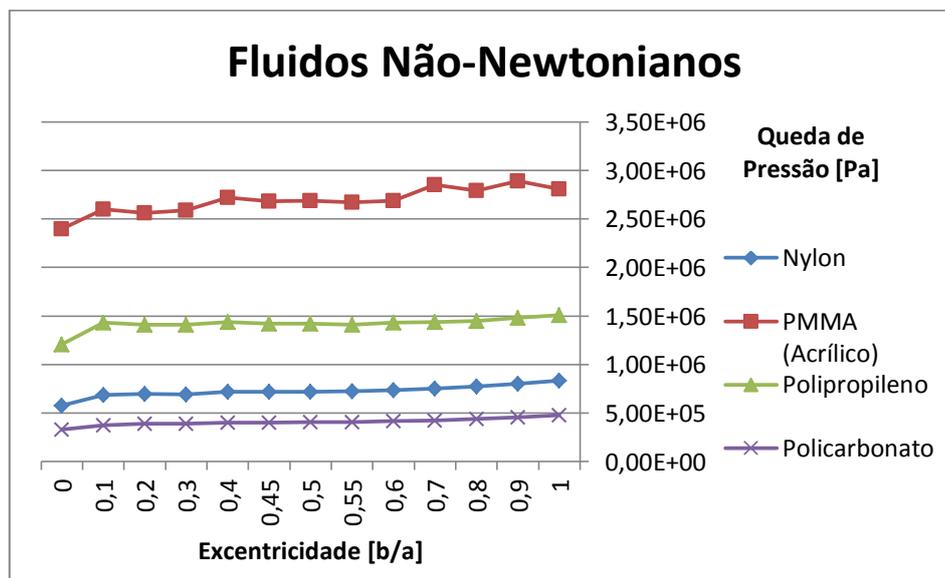


Figura 5.4: Fluidos não newtonianos.

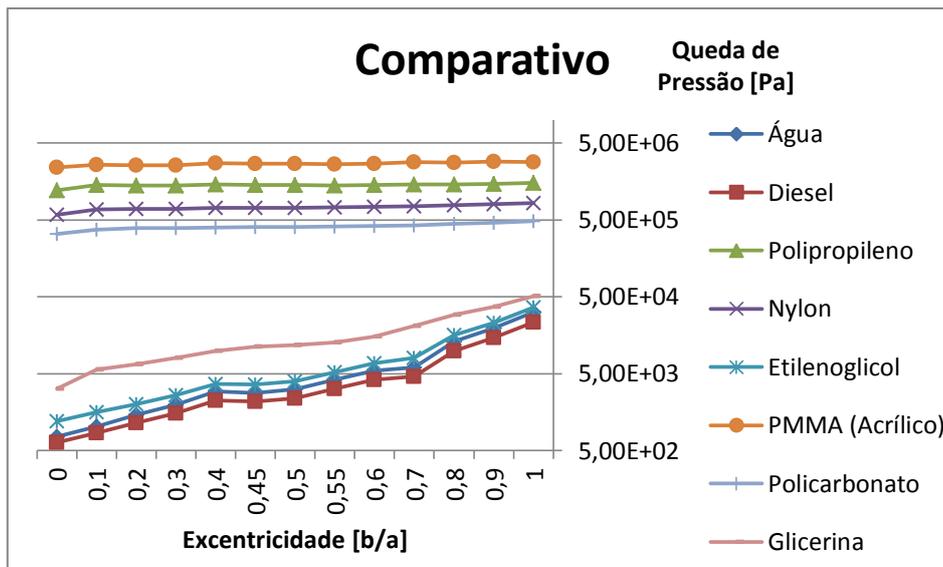


Figura 5.5: Comparativo dos resultados.

6. CONCLUSÕES

Após o estudo apresentado, pode-se ver que existe uma relação entre a excentricidade do obstáculo e a queda de pressão que ocorre nos dutos. Este resultado é bastante interessante no que diz respeito a escoamentos sujeitos a obstruções, como os encontrados nas indústrias petroquímicas e de alimentos, pois pode ajudar a diminuir paradas desnecessárias para manutenções, simplesmente escolhendo bombas que podem operar até uma faixa maior de pressões quando as tubulações encontram certo grau de obstrução, sem causar, neste caso, gastos muito elevados devido a um superdimensionamento. Por exemplo, o aumento na pressão do escoamento começa a ser significativamente maior para excentricidades superiores a 0,65. Para excentricidades menores a queda de pressão é menos significativa. O fator que mais influencia na queda de pressão é o aumento do semieixo menor do obstáculo em forma de elipse.

Em virtude de este ser um estudo preliminar, os resultados obtidos mostram-se animadores quando se pensa em estudos futuros, nos quais se podem obter correlações entre a excentricidade das obstruções e a perda de carga do escoamento, porém, para isso, seriam necessários mais estudos e uma variação de outros parâmetros, tais como a velocidade do escoamento, a dimensão da tubulação, do obstáculo, e claro, dos fluidos escolhidos, visando uma maior abrangência de viscosidades e tipos de fluidos, como os plásticos de Bingham.

É interessante notar a abrangência que pode ser alcançada através de resultados semelhantes, mantendo-se as devidas proporções, áreas como a medicina podem se beneficiar de estudos semelhantes para desenvolver novas maneiras de tratar doenças como a arteriosclerose, por exemplo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ansys Fluent; <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics/Fluid+Dynamics+Products/ANSYS+Fluent>. Acessado em 02/03/2015.

Ansys Inc.; “Tutorials, Examples and Curriculum”, <http://www.ansys.com/Industries/Academic/Tools/Curriculum+Resources/Tutorials,+Examples+&+Curriculum>. Acessado em 02/03/2015.

Chhabra, R. P.; Richardson, J. F.; **“Non-Newtonian Flow and Applied Rheology”**, Elsevier, 2nd edition, 2008.

Ferraz, J. G.; Nunes, B. R.; Rodrigues, M. K.; Brum, R. S.; Souza, J. A.; Rocha, L. A. O.; Isoldi, L. A.; dos Santos, E. D. ; **“Modelagem Computacional de um Trocador de Calor Solo-Ar Empregando Diferentes Modelagens para Turbulência”**. VI Conferência Sul em Modelagem Computacional (MCSul), Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande-RS, Brasil, 27-29 Outubro de 2014.

Fox, R. W.; Pritchard, P. J.; McDonald, A. T.; **“Introdução à Mecânica dos Fluidos”**, LTC, 7^a edição, 2010.

How, T. V.; Blac, R. A.; Annis, D.; **“Comparison of Pressure Losses in Steady Non-Newtonian Flow Through Experimental Tapered and Cylindrical Arterial Protheses”**. Journal of Biomedical Engineering, 1988, Vol. 10.

Manica, R.; **“Simulação de Escoamentos Incompressíveis Não Newtonianos em Dutos com Expansão Brusca”**. 2003. 72 f..Dissertação (Mestrado em Matemática Aplicada) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós Graduação em Matemática Aplicada, Porto Alegre, 2003.

Ribeiro, F. S.; Souza, P. R.; Braga, S. L.; **“Obstruction of pipelines due to paraffin deposition during the flow of crude oils”**. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 40, n° 18.

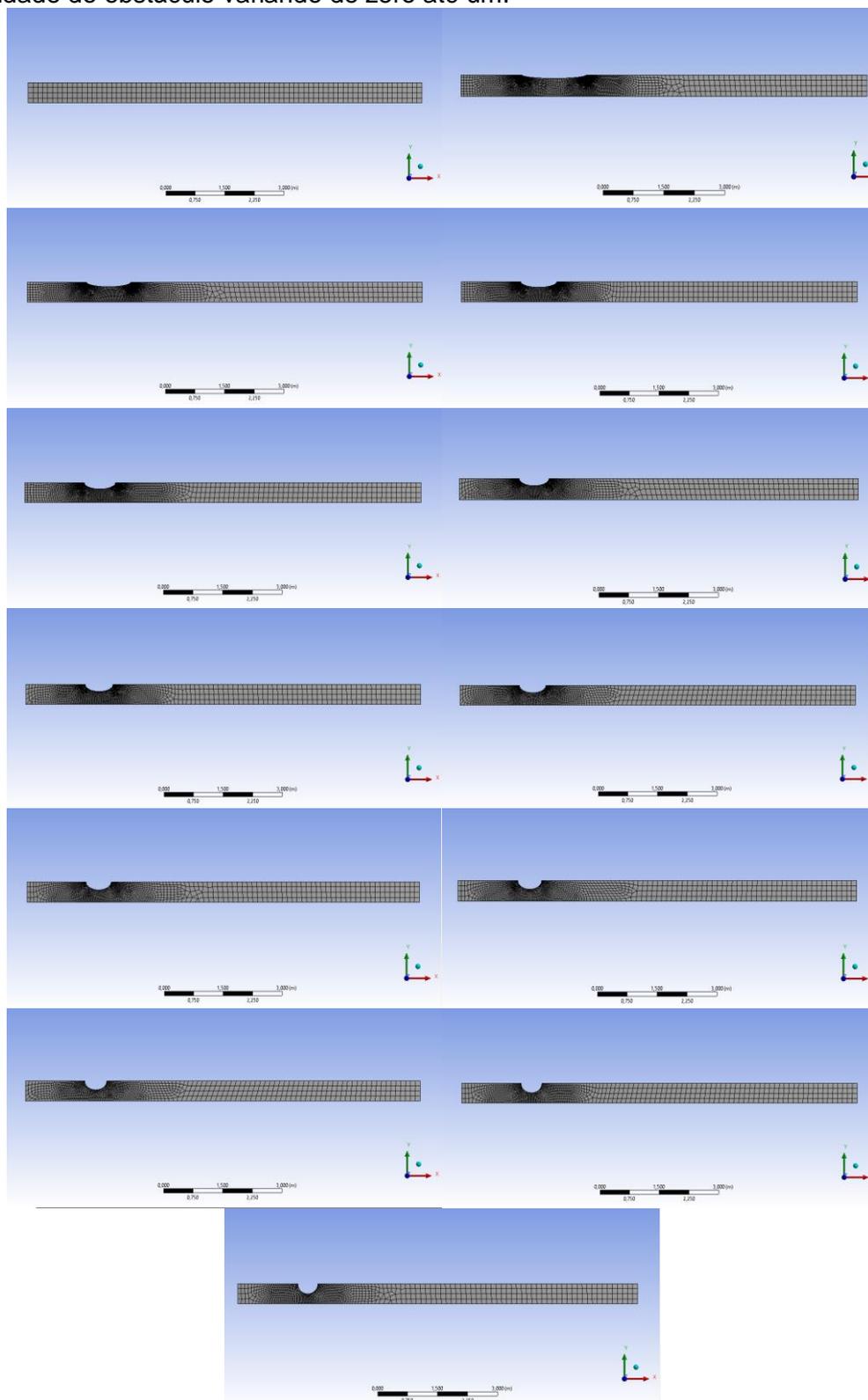
Trinh, K. T.; **“The Instantaneous Wall Viscosity in Pipe Flow of Power Law Fluids: Case Study for a Theory of Turbulence in Time-Independent Non-Newtonian Fluids”**. <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0912/0912.5249.pdf>, 2009. Acessado em 24/04/2015.

Yang, C.; Mao, Z.; **“Numerical Simulation of Viscous Flow of a Non-Newtonian Fluid Past an Irregular Solid Obstacle by the Mirror Fluid Method”**. Third International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, CSIRO, Melbourne, Australia, 10-12 December 2003.

ANEXO(S)

ANEXO 1 – MALHAS UTILIZADAS

Excentricidade do obstáculo variando de zero até um.



ANEXO 2 – TABELAS DE RESULTADOS

Água		Diesel		Etilenoglicol		Glicerina	
e (b/a)	P inicial (Pa)						
1	31505,2	1	23330,8	1	3,64E+04	1	5,11E+04
0,9	19690,9	0,9	14642,1	0,9	2,30E+04	0,9	3,72E+04
0,8	13200	0,8	9928,7	0,8	1,60E+04	0,8	2,91E+04
0,7	6030,65	0,7	4559,9	0,7	7,95E+03	0,7	2,10E+04
0,6	5494,98	0,6	4170,75	0,6	6,81E+03	0,6	1,52E+04
0,55	4155,24	0,55	3159,89	0,55	5,19E+03	0,55	1,28E+04
0,5	3112,7	0,5	2383,74	0,5	4,00E+03	0,5	1,18E+04
0,45	2815,45	0,45	2155,1	0,45	3,62E+03	0,45	1,11E+04
0,4	2957,62	0,4	2247,47	0,4	3,69E+03	0,4	9,85E+03
0,3	1978,93	0,3	1535,64	0,3	2,64E+03	0,3	8,03E+03
0,2	1448,92	0,2	1140,64	0,2	2,01E+03	0,2	6,61E+03
0,1	1033,41	0,1	845	0,1	1,56E+03	0,1	5,61E+03
0	762	0	634,23	0	1,21E+03	0	3,19E+03
TURBULENTO		TURBULENTO		TURBULENTO		TURBULENTO	
Velocidade [m/s]	3						
Densidade [kg/m³]	998	Densidade [kg/m³]	730	Densidade [kg/m³]	1113,2	Densidade [kg/m³]	1260
Viscosidade [Pa*s]	0,001003	Viscosidade [Pa*s]	0,0024	Viscosidade [Pa*s]	0,02	Viscosidade [Pa*s]	1,5
Re	2,99E+06	Re	9,13E+05	Re	1,67E+05	Re	2,52E+03

Nylon		PMMA (Acrílico)		Polipropileno		Policarbonato	
e (b/a)	P inicial (Pa)	e (b/a)	P inicial (Pa)	e (b/a)	P inicial (Pa)	e (b/a)	P início (Pa)
1	8,32E+05	1	2,81E+06	1	1,51E+06	1	4,79E+05
0,9	8,03E+05	0,9	2,89E+06	0,9	1,48E+06	0,9	4,58E+05
0,8	7,75E+05	0,8	2,79E+06	0,8	1,45E+06	0,8	4,42E+05
0,7	7,51E+05	0,7	2,85E+06	0,7	1,44E+06	0,7	4,25E+05
0,6	7,36E+05	0,6	2,69E+06	0,6	1,43E+06	0,6	4,16E+05
0,55	7,27E+05	0,55	2,67E+06	0,55	1,41E+06	0,55	4,09E+05
0,5	7,21E+05	0,5	2,69E+06	0,5	1,42E+06	0,5	4,05E+05
0,45	7,18E+05	0,45	2,68E+06	0,45	1,42E+06	0,45	4,04E+05
0,4	7,18E+05	0,4	2,72E+06	0,4	1,44E+06	0,4	4,01E+05
0,3	6,93E+05	0,3	2,59E+06	0,3	1,41E+06	0,3	3,93E+05
0,2	6,96E+05	0,2	2,56E+06	0,2	1,41E+06	0,2	3,90E+05
0,1	6,84E+05	0,1	2,60E+06	0,1	1,43E+06	0,1	3,77E+05
0	5,80E+05	0	2,40E+06	0	1,21E+06	0	3,30E+05
LAMINAR		LAMINAR		LAMINAR		LAMINAR	
Velocidade [m/s]	3	Velocidade [m/s]	3	Velocidade [m/s]	3	Velocidade [m/s]	3
Densidade [kg/m³]	1140	Densidade [kg/m³]	1180	Densidade [kg/m³]	946	Densidade [kg/m³]	1200
Viscosidade [Pa*s]		Viscosidade [Pa*s]		Viscosidade [Pa*s]		Viscosidade [Pa*s]	
m (k na equação)	1800	m (k na equação)	25000	m (k na equação)	7500	m (k na equação)	1000
n	0,65	n	0,25	n	0,4	n	0,65
T [K]	493	T [K]	493	T [K]	473	T [K]	553
Re lp	5,32E+00	Re lp	1,33E+00	Re lp	2,24E+00	Re lp	1,01E+01
Re crit	2,31E+03	Re crit	2,27E+03	Re crit	2,40E+03	Re crit	2,31E+03

APÊNDICE(S)

APÊNDICE 1 – DIAGRAMA DE MOODY

