

## **AVALIAÇÃO DO PERFIL DE ESCOAMENTOS MULTIFÁSICO AR-ÁGUA VIA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E BANCADA EXPERIMENTAL**

**Leonardo D'Agostin Resendes<sup>1</sup>**

**Guilherme Bampi Righeto<sup>2</sup>**

**Resumo:** A existência de incrustações e partículas sólidas como ferrugem e escória de soldagem em fluidos prejudica a fluidez do escoamento, reduzindo a vida útil de componentes instalados e a eficiência do fluxo. Como solução imediata, faz-se necessário a utilização de métodos de limpeza de tubulação para manter um fluxo contínuo. O *flushing* e o *air scouring* são técnicas que visam o aumento de velocidade do fluido de trabalho a fim de realizar a limpeza interna de tubulações. A presente pesquisa propõe o desenvolvimento de uma bancada que permita realizar uma análise do escoamento através da injeção de ar em um fluxo de água, afim de aumentar a velocidade do escoamento e efetuar a limpeza do tubo. A bancada conta com uma tubulação de acrílico de 22 mm de diâmetro, com 4 mm de espessura e com 1,5 m de comprimento, e possui sensores de vazão na entrada de água e de ar e sensor de pressão na entrada de água. Desenvolvendo um escoamento do tipo *slug* afim de aumentar a tensão de cisalhamento nas paredes internas do tubo, foram realizadas simulações computacionais fluido dinâmicas (CFD) no *software* ANSYS utilizando o método VOF com algumas faixas de velocidades de água conforme o mapa de escoamento desenvolvido por Taitel e Dukler. A maior velocidade adotada foi de 2 m/s para água e 6 m/s para ar, que conseqüentemente apresentou uma tensão de cisalhamento máxima de aproximadamente 20 Pa no ponto em que ocorre a formação do *slug*. Portanto, a formação do *slug* resultou em uma tensão de cisalhamento nas paredes internas da tubulação maior que o restante do escoamento. Gerando uma força de arrasto na parede superior do tubo para carregar as incrustações presas no interior dos tubos.

**Palavras-chave:** Escoamento multifásico. *Slug flow*. CFD. VOF. Tensão de Cisalhamento.

### **1 INTRODUÇÃO**

A presença de contaminantes em fluídos dentro de tubulações hidráulicas resultam em grandes problemas para o fluxo do sistema, as partículas sólidas e incrustações presentes no fluido de trabalho podem se acumular no interior das tubulações interrompendo o fluxo contínuo. Dessa maneira se torna necessário um

---

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Mecânica, 2023. E-mail: leonardo\_dagostin@hotmail.com

<sup>2</sup> Prof. do Centro Universitário UniSATC. E-mail: guilherme.righeto@satc.edu.br



procedimento que consiga atuar nas tubulações de forma que retire as incrustações e mantenha um fluxo eficiente no sistema (SUTHERLAND, 2008).

Contaminantes como ferrugem, incrustações soltas, escória de soldagem, areia, sujeira, aumentam o desgaste e causam danos nas válvulas de controle e instrumentações do sistema atuante, fazendo com que a vida útil dos componentes diminua (FILTROVALI, 2022).

Dessa maneira, a utilização de uma bancada experimental se mostra como uma alternativa viável para realizar futuros estudos e análises a fim de solucionar possíveis problemas relacionados obstrução da tubulação e má condutibilidade do escoamento.

Para realização de limpeza interna de tubulações e conseqüentemente a eliminação dos contaminantes, aplica-se a norma ASTM D6439. A referida norma apresenta e prescreve as medidas necessárias para realizar métodos de limpeza de tubulação, sendo elas: fluxo escoar em regime turbulento ( $Re > 4000$ ) não podendo ultrapassar a temperatura de 70 °C.

Um dos métodos conhecidos utilizado para limpeza de tubulação é o *flushing*, esse processo ocorre através do bombeamento de óleo de baixa viscosidade, escoado em regime turbulento, ou seja, escoando em altas velocidades, conforme a norma ASTM D6439. Com isso o óleo consegue, através da força de arrasto, arrancar as incrustações e partículas sólidas presentes na tubulação.

Outro método é o *air scouring*, Pourcel (2016) afirma que esse processo consiste em injetar ar em uma tubulação de água através de um compressor e válvulas de controle. Injetando o ar em grandes velocidades, a energia cinética acaba agregando no escoamento de água e assim transformando em um fluxo turbulento o suficiente para realizar o arrasto das partículas e incrustações presentes na superfície interna da tubulação.

Durante o fluxo na tubulação há uma perda de carga provocada pelo atrito entre o fluido e a parede da tubulação, e entre o próprio líquido onde há o surgimento de forças resistentes. Essas forças são denominadas de cisalhantes que reduzem a capacidade do fluido de escoar. As forças cisalhantes são diretamente proporcionais a velocidade do escoamento do fluido, logo, um escoamento turbulento acaba gerando uma maior força de resistência do movimento havendo maior perda de carga (MATIAS, 2013).

Embora os estudos que norteiam essa área ainda não sejam abrangentes, a junção dos processos de *flushing* e a utilização do *air scouring* podem gerar grandes resultados tendo em vista que não há a necessidade de bombear o fluido de trabalho em grandes velocidades, já que o ar injetado vai realizar essa função de aumento de velocidade do sistema para promover o regime turbulento, fazendo com que diminua a potência de acionamento dos equipamentos que irão realizar o *flushing*.

Usando os processos de *flushing* e *air scouring*, buscou-se promover um escoamento de mistura ar-água de modo a validar a hipótese de aumento da tensão de cisalhamento nas paredes. Isso melhora a capacidade de arrasto das partículas e promove uma melhor limpeza interna dos tubos mediante ao escoamento obtido por meio da simulação computacional desenvolvida pelo *software* ANSYS. Desse modo, podendo comparar a formação de escoamento via *software* com a formação desenvolvida em uma bancada experimental.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

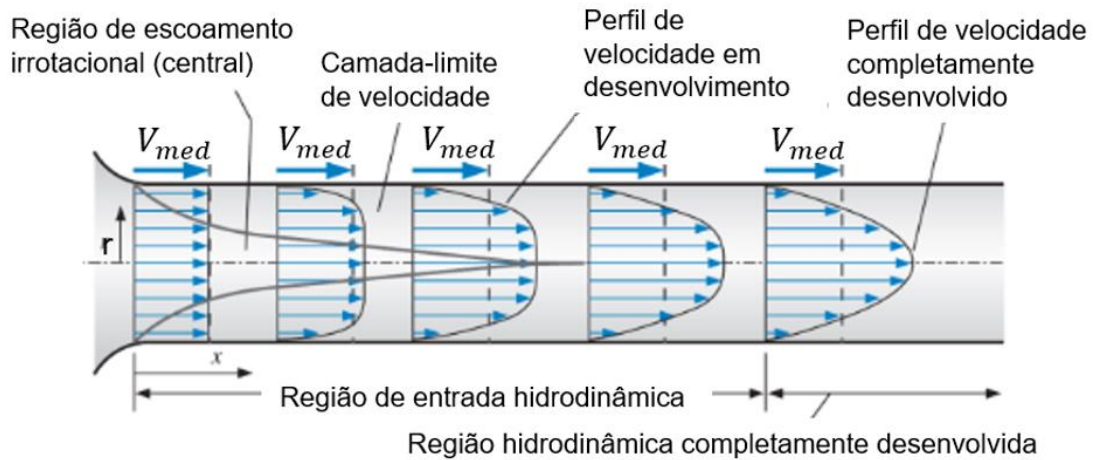
Para continuidade são necessários conceitos para melhor compreensão do projeto, como: tensão de cisalhamento na parede da tubulação, regime turbulento, perda de carga, vazão volumétrica, *slug flow*, *taitel-dukler* mapa de regime de escoamento.

### 2.1 TENSÃO DE CISALHAMENTO NA PAREDE DA TUBULAÇÃO

A tensão está diretamente ligada ao atrito contido na rugosidade da parede da tubulação, como a tubulação possui uma posição fixa as partículas do fluido que estão em contato tendem a reduzir suas respectivas velocidades por conta do atrito gerando essa força que contraria o movimento do fluxo, denominada de tensão de cisalhamento (ÇENGEL, 2015).

Conforme a Fig. 1, a desaceleração do fluido na parede da tubulação proporciona um desenvolvimento de velocidade no meio da tubulação.

Figura 1: Formação de um escoamento monofásico até o desenvolvimento de velocidade completo em regime permanente.



Fonte: Çengel (2015).

O desenvolvimento que ocorre de forma gradual, desde a entrada do fluido na tubulação até formar um perfil de velocidade completamente desenvolvido, a região afetada pela força cisalhante é denominada de região camada-limite de velocidade por conta da viscosidade do fluido em contato com a parede.

Já a região de escoamento irrotacional (central) o efeito do atrito que causa a tensão de cisalhamento na parede é desprezível pois se encontra numa posição em que não sofre a desaceleração e mantém um pequeno gradiente de velocidades.

Segundo Lages (2019), a tensão de cisalhamento pode ser expressa através da lei de Newton da viscosidade, a qual é representada pela Eq. 1:

$$\tau_{yx} = -\mu \cdot \frac{du_x}{dy} \quad (1)$$

Dessa forma, os fluidos que seguem esse tipo de padrão de escoamento são denominados de fluidos newtonianos, e quando apresentarem maiores velocidades conseqüentemente haverá maior tensão de cisalhamento na parede da tubulação, significando uma maior perda de carga.

## 2.2 REGIME TURBULENTO

O regime de escoamento é caracterizado através do número de Reynolds ( $Re$ ), Osborne Reynolds correlacionou os critérios necessários para se caracterizar



um tipo de escoamento. Podendo ser um regime laminar ( $Re \leq 2000$ ), transiente ( $2000 < Re < 4000$ ) ou turbulento ( $Re \geq 4000$ ), conforme as normas estabelecidas pela ABNT NBR 10396. O número de Reynolds é uma grandeza adimensional que sofre influências das forças de inércia e da força viscosa que atuam no fluido (FOX, 2006).

No regime turbulento as partículas do fluido se movem de maneira desordenada e aleatória fazendo com que haja uma mistura entre o fluido. Com intuito de atingir os objetivos do projeto, será adotado o regime de escoamento turbulento para que haja a mistura entre os fluidos ar-água e assim consigam realizar o *flushing* necessário. A equação que define o número de Reynolds é dada através da Eq. 2:

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (2)$$

Dependendo do número de Reynolds, para regime turbulento segundo Oliveira (2010), o escoamento necessita de um certo comprimento para realizar sua formação completa, representado através da Eq. 3:

$$Le = d \cdot 4,4 \cdot Re^{\frac{1}{6}} \quad (3)$$

### 2.3 PERDA DE CARGA

Perda de carga é relacionada a quantidade de energia perdida por conta do atrito que ocorre dentro da tubulação, no caso de uma tubulação linear a perda de carga é considerada distribuída e está diretamente relacionada com o comprimento e o diâmetro da tubulação que o fluido está escoando.

Em análise a Eq. 4, pode-se determinar a quantidade de perda de carga que está ocorrendo em determinado sistema proposto por Darcy-Weisbach (WHITE, 2006).

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2 \cdot \rho}{2} \quad (4)$$

Segundo Oliveira (2010), para determinação do fator de atrito, deve-se considerar a equação de Blasius ajustada relacionando o atrito com o número de



Reynolds, conforme a Eq. 5, essa equação traduz a curva do diagrama Moody referente a tubos lisos em regime turbulento.

$$f = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \quad (5)$$

A perda de carga está relacionada também a altura que fluido necessita subir até atingir o nível da tubulação, a equação matemática que representa essas condições é representada pela Eq. 6 (OLIVEIRA, 2010).

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h \quad (6)$$

## 2.4 VAZÃO VOLUMÉTRICA

Conforme a Eq. 7, a vazão volumétrica representa a quantidade de volume de fluido que atravessa uma determinada seção transversal em um determinado tempo (LINSIGEN, 2016).

$$Q = A \cdot V \quad (7)$$

A vazão relacionada a pressão de operação do sistema, resulta na potência de acionamento necessária para bomba suprir a demanda de fluxo, através da Eq. 8:

$$Na = Q \cdot P \quad (8)$$

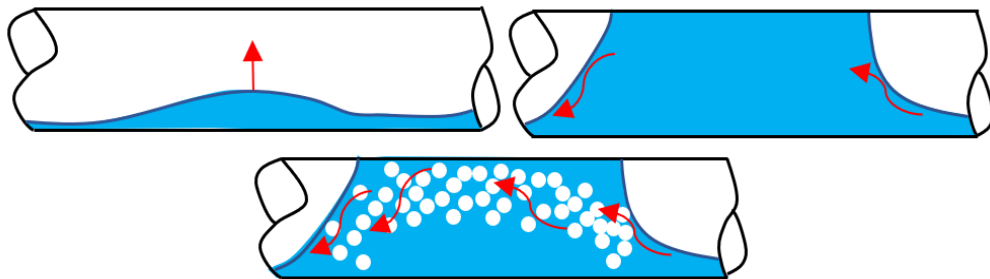
## 2.5 SLUG FLOW

Segundo Bonizzi (2003), o *slug flow*, ou escoamento pistonado, é um tipo de escoamento mais comum quando se refere a um fluxo multifásico ar-água, muito utilizado principalmente em indústria petrolíferas.

O padrão de escoamento *slug* é caracterizado por uma vasta bolha de ar, denominada de bolha de Taylor, que antecede uma longa mistura líquida com pequenas bolhas. Quanto maior o diâmetro da tubulação maior será a quantidade de bolhas contidas no fluido líquido (MANEGHINI, 2014).

Ainda segundo Maneghini (2014), o padrão *slug flow* origina-se a partir da união das pequenas bolhas dispersas no fluido multifásico formando a bolha de Taylor, porém algumas bolhas continuam dispersas no fluxo e acabam alterando parâmetros fundamentais de escoamento, como velocidade final da bolha de Taylor, distribuição da força cisalhante na parede da tubulação, na qual influenciam diretamente na perda de carga do sistema. O *slug flow*, Fig. 2, ocorre a partir de um processo de 3 etapas.

Figura 2: Processo de formação de um escoamento do tipo *slug* dividido em 3 etapas.



Fonte: Al-Hashimy (2016).

O processo é iniciado pela estratificação dos fluidos. Dessa forma o líquido se localiza na parte inferior da tubulação e o gás na parte superior já que sua densidade é menor. Em seguida, conforme o fluido escoar o gás encontra ondas do líquido havendo uma rápida queda de pressão seguida de uma recuperação, surgindo pequenas bolhas de gás dentro do líquido que acabam realizando uma força para cima carregando onda até atingir o topo da tubulação. Por fim, essa formação acaba sendo empurrada pelo gás que está sendo injetado aumentando a velocidade do fluido (AL-HASHIMY, *et al.*, 2016).

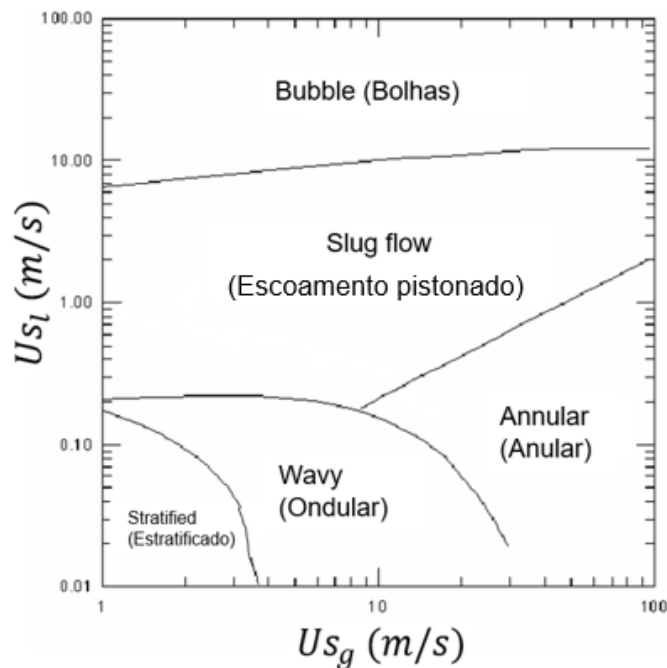
## 2.6 TAITEL-DUKLER MAPA DE REGIME DE ESCOAMENTO

Segundo Kanizawa (2011), Taitel-dukler flow regime map ou mapa de padrões de escoamento desenvolvido por *Taitel* e *Dukler* em 1976 foi o primeiro mapa utilizando critérios de análise fenomenológica dos mecanismos presentes no sistema.

Esse mapa, conforme a Fig. 3 relaciona a velocidade do líquido com a velocidade do gás que está entrando no sistema de tubos horizontais, e assim poder

estabelecer uma relação de regime de escoamento que esta ocorrendo. Considerando os mecanismos físicos, o mapa de escoamento proposto por Taitel e Dukler apresenta os regimes em forma de regime estratificado, regime ondular, anular, *slug flow* e regime com bolhas dispersas.

Figura 3: Mapa de regime de escoamento desenvolvido por Taitel e Dukler relacionando as velocidades de entrada do líquido e do gás.



Fonte: Ortega (2005).

Com o aumento da velocidade da fase líquida durante escoamento estratificado, e conseqüente aumento da turbulência do escoamento, o líquido tende a subir por conta da força que o vapor faz nas ondas do fluído e a alta velocidade do gás empurra as ondas formadas gerando o *slug flow*.

Dessa forma, utilizando o mapa de Taitel e Dukler (1976) é possível dimensionar a velocidade de entrada dos fluídos para se obter o tipo de escoamento desejado, no caso do atual projeto, o escoamento do tipo *slug*.

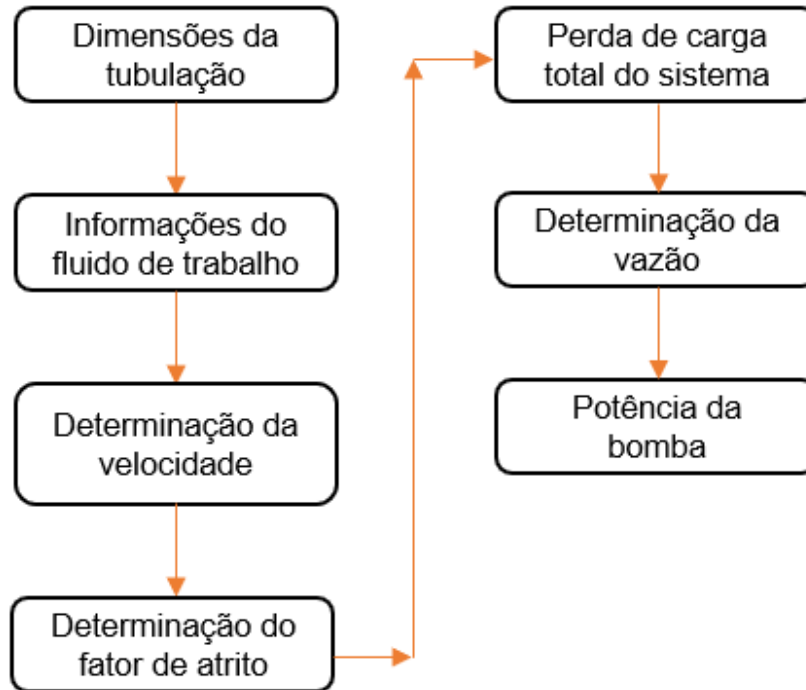
### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA MÍNIMA DA BOMBA CENTRÍFUGA



O desenvolvimento das equações para dimensionamento da potência mínima da bomba hidráulica pode ser analisado mediante a Fig. 4, representando as etapas de dimensionamento.

Figura 4: Esquema representativo das etapas para dimensionamento da bomba hidráulica.



Fonte: Autor (2023).

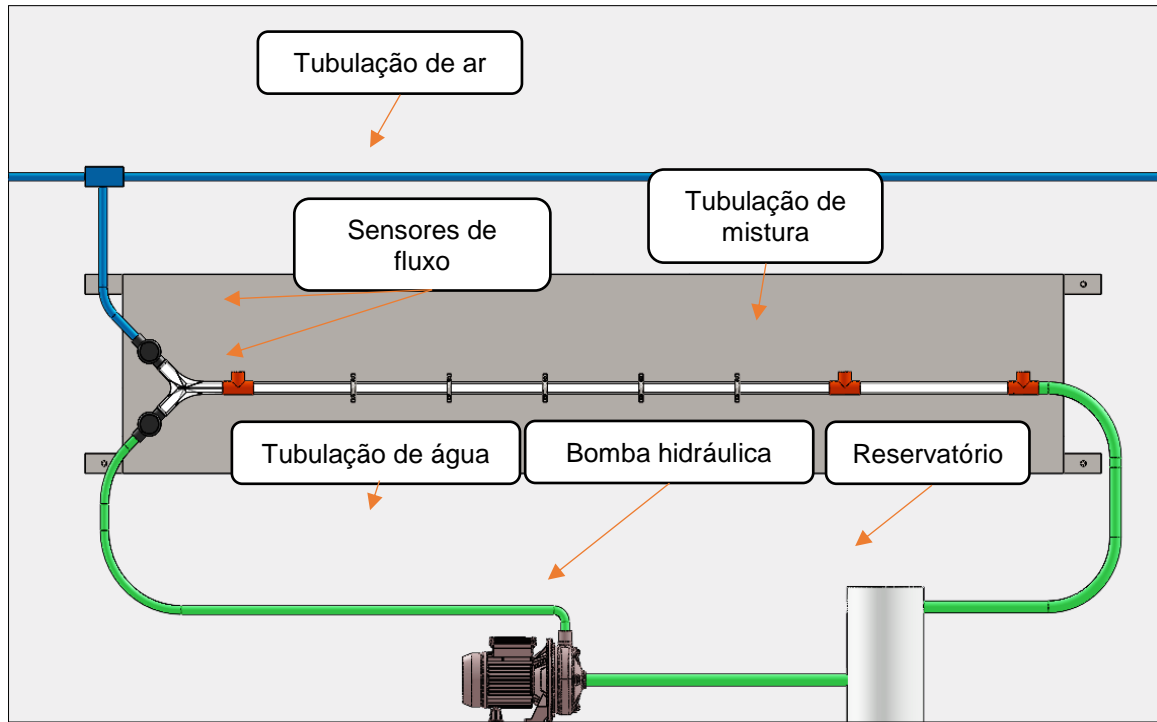
O dimensionamento da bomba hidráulica inicia-se a partir dos dados da tubulação e informações do fluido atuante, que mediante a utilização das equações propostas na revisão bibliográfica, foi realizada a determinação da velocidade, fator de atrito, perda de carga do sistema e a determinação da vazão, afim de determinar a potência de acionamento da bomba hidráulica.

### 3.2 MONTAGEM DA BANCADA

A bancada iniciou-se a partir do dimensionamento realizado por meio de todas equações e a utilização de componentes comerciais como a bomba hidráulica e tubulações de acrílico para melhor visualização da formação do escoamento. Desse modo, foram realizadas simulações de montagem mediante o *software* de

modelamento em CAD 3D SolidWorks®, Fig. 5, afim de desenvolver um projeto que auxiliaria no processo de montagem real da bancada experimental.

Figura 5: Montagem bancada experimental realizada por meio do *software* de CAD 3D SolidWorks®.



Fonte: Autor (2022).

Utilizando um tubo de acrílico com 1,5 m de comprimento e 22 mm de diâmetro interno. Tendo a entrada dos fluidos mediante um Y na horizontal construído em uma impressora 3D. Possuindo uma divisória na saída, impedindo que a água e o ar se misturem na entrada do sistema. Água sendo bombeada na parte inferior com a utilização da bomba centrífuga e o ar comprimido sendo injetado na parte superior através de um sistema de ar integrado da UniSATC.

### 3.3 INSTRUMENTAÇÃO

A bomba utilizada no sistema de alimentação de água, conforme Fig. 6a, é uma bomba centrífuga de 0,33 cv modelo BC-91 S trifásica 220/380 V, tendo sua rotação controlada por meio de um inversor de frequência, Fig. 6b, modelo CFW300.

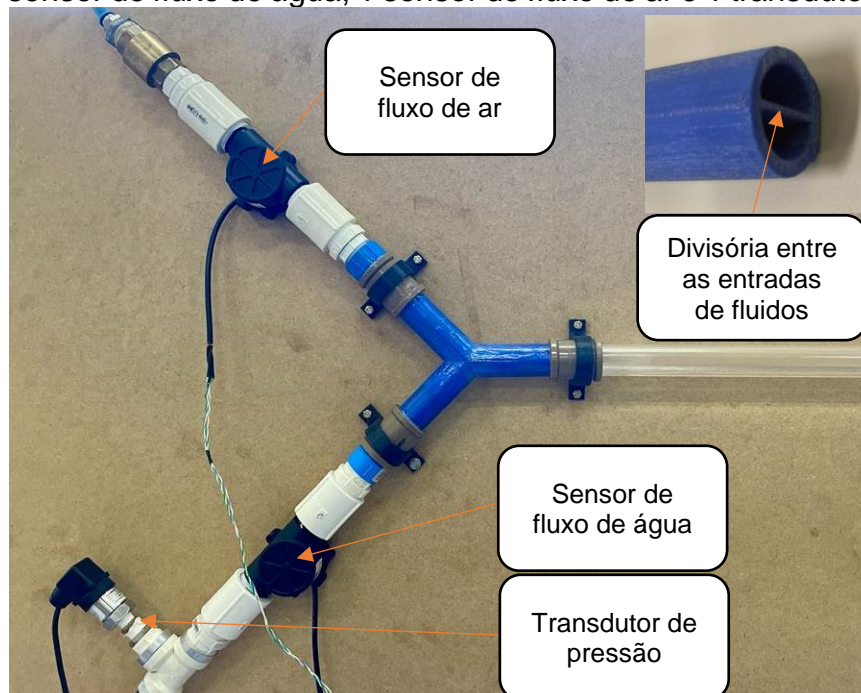
Figura 6: Componentes utilizados para alimentação do sistema de água. a) Bomba hidráulica modelo BC-91 S. b) Inversor de frequência modelo CFW300.



Fonte: Autor (2023).

Para controle, a entrada da tubulação de água e de ar conta com a presença de sensores de fluxo de água e ar e um transdutor de pressão, Fig. 7, para que seja possível a análise do escoamento nas condições propostas.

Figura 7: Sensores utilizados na bancada de testes de escoamento, 1 sensor de fluxo de água, 1 sensor de fluxo de ar e 1 transdutor de pressão.



Fonte: Autor (2023).

Ao final de toda tubulação, o fluxo é direcionado através de uma mangueira para um tanque aberto e assim a água é separada do ar e direcionado novamente para bomba, que irá bombear a água para o início da tubulação dando continuidade ao sistema.

Conforme a Tab. 1, pode-se verificar a utilização e as especificação de todos os componentes utilizados no desenvolvimento da bancada experimental.

Tabela 1: Lista de todos os componentes utilizados para o funcionamento e controle da bancada de testes.

<b>Componente</b>	<b>Modelo</b>	<b>Especificação</b>
Sensor de fluxo para água	DN25	Capacidade até 100 lpm
Transmissor de pressão	VKP-011	Capacidade de 0 a 15 bar
Bomba centrífuga	BC-91 S	0,33 cv, trifásica, 220/380 V, Rt Alumínio
Inversor de frequência	CFW300	4 entradas digitais PNP ou NPN, 1 saída a relé 0,5A / 250 V CA, 1 entrada analógica 0-10 V CC / 4-20 mA

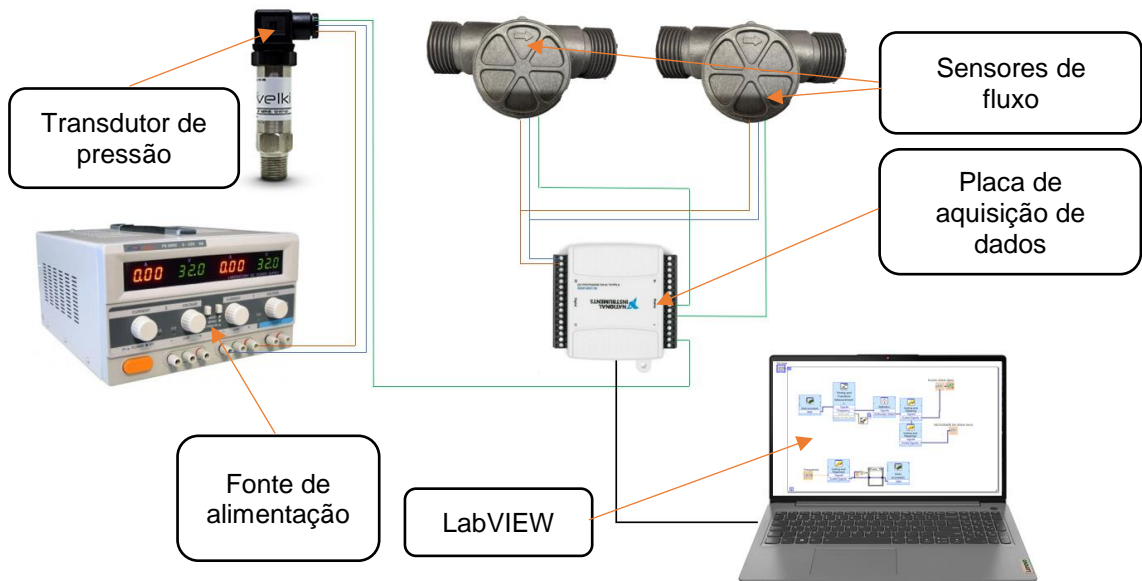
Fonte: Autor (2023).

### 3.4 PARÂMETROS DE TESTE E OBTENÇÃO DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

Para início dos ensaios de funcionamento da bancada foi necessário a obtenção da função de transferência dos sensores de medição para que tenha a variável de saída correta para pesquisa. Ambos os sensores de fluxo de ar e água, e o sensor de pressão foram calibrados utilizando o inversor de frequência que através da alteração de rotação fornecia vazões e pressões diferentes na tubulação.

A programação foi realizada utilizando o *software* LabVIEW®, que por sua vez através de uma placa de aquisição, é possível traçar uma linha padrão de primeiro grau onde cada sinal emitido pelo sensor resultará em um dado de saída. Sendo os sensores de fluxo com sinais de saída de vazão na unidade de lpm e de velocidade na unidade de m/s, e o sensor de pressão com sinal de saída em kPa. Dessa forma, conforme a Fig. 8, foi desenvolvido um esquema para representar o funcionamento de cada sensor.

Figura 8: Esquema representando o funcionamento dos sensores utilizados com o *software* LabVIEW®.



Fonte: Autor (2023).

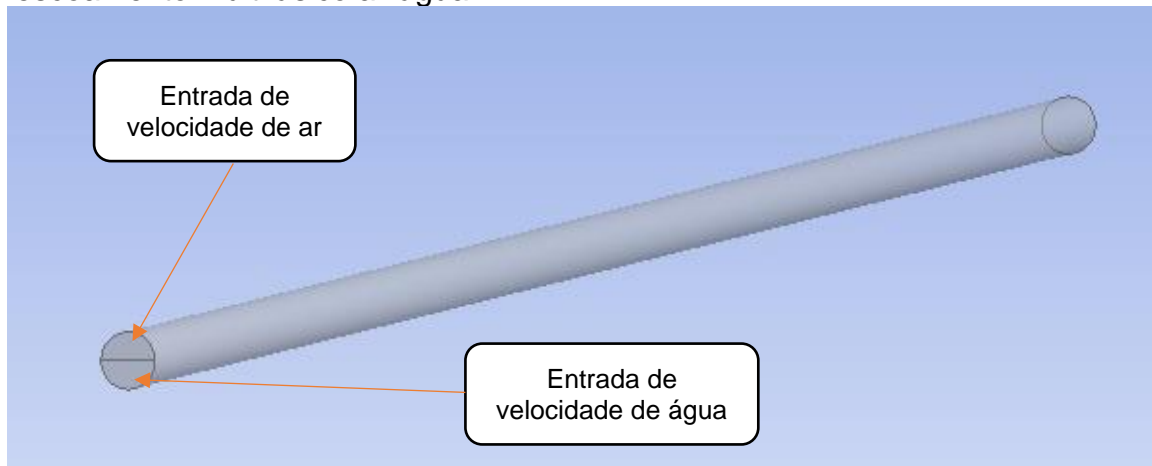
Os sensores de fluxo são alimentados com uma tensão de 5 V, sendo que a placa de aquisição já fornece essa alimentação, diferente do transdutor que necessita de uma alimentação de 15 a 32 V, dessa maneira, foi utilizado uma fonte de alimentação externa.

Os sinais de saída de cada sensor conectado diretamente na placa de aquisição de dados, que por sua vez está conectada em um computador utilizando o *software* de programação LabVIEW®.

### 3.5 PROCEDIMENTO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DESENVOLVIDA NO SOFTWARE ANSYS

A simulação foi desenvolvida a partir de um segmento de tubo linear, Fig. 9, dividindo a seção transversal referente ao diâmetro da tubulação de forma que cada metade se refere a entrada de um dos fluidos.

Figura 9: Geometria desenvolvida no software ANSYS® para simulação de escoamento multifásico ar-água.

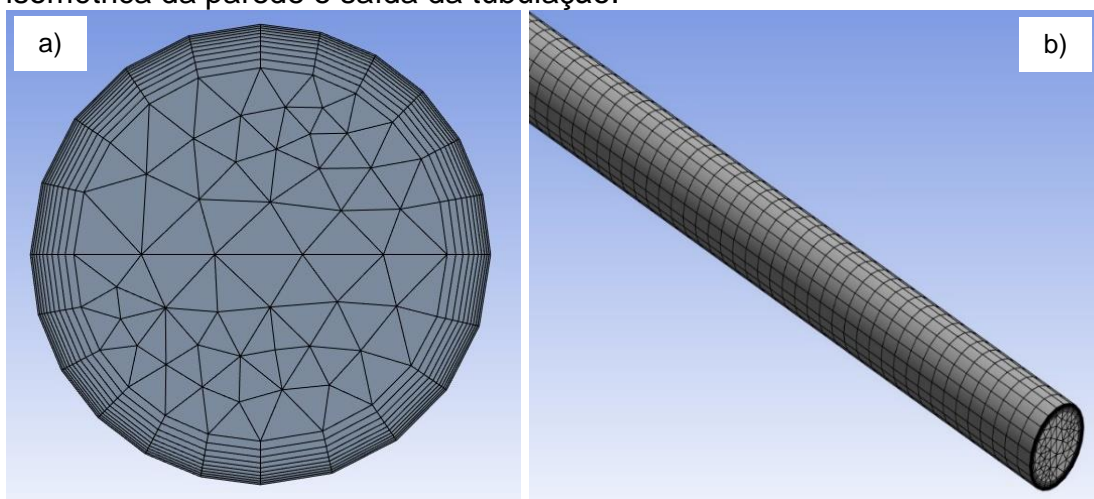


Fonte: Autor (2023).

A geometria gerada possui duas entradas separadas para cada fluido e tem um comprimento linear total de 3 metros, afim de observar toda a formação natural do *slug flow*, por conta da entrada totalmente estratificada dos fluidos.

Após o desenvolvimento da geometria, foi realizado o refinamento da malha, Fig. 10, para que as propriedades de conservação de massa e de quantidade de movimento sejam transferidas de forma coerente.

Figura 10: Refinamento da malha da geometria para transferência das propriedades no software ANSYS®. a) Vista frontal da entrada dos fluidos. b) Vista isométrica da parede e saída da tubulação.



Fonte: Autor (2023).

Foi utilizado uma malha do tipo tetraédrica, o refinamento da malha foi realizado utilizando o método de inflação para obter o gradiente de velocidade na



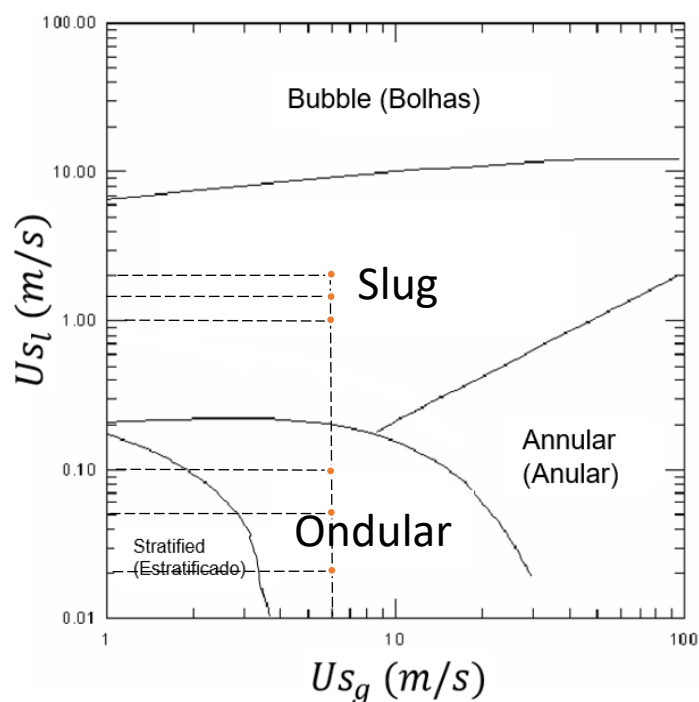
parede da tubulação e desenvolver a tensão de cisalhamento causada com a formação do *slug flow*, totalizando 188400 elementos e 167679 nós.

O modelo de simulação multifásica utilizado foi o transiente e VOF (*Volume of Fluid*) com duas fases: a fase primária sendo a água e a secundária o ar à 25 °C, considerando a segunda incompressível, com uma tensão superficial de 0,072 N/m na interface.

A solução da simulação foi desenvolvida para que relacione as velocidades de entrada do ar e da água a fim de desenvolver o *slug flow*, conforme o mapa de escoamento proposto por Taitel e Dukler (1976), e comparar os resultados de tensão de cisalhamento predominante na parede interna do tubo durante todo o escoamento.

Foram realizadas ao total 6 simulações, relacionando 6 faixas de velocidades para a água, Fig. 11, sendo de 0,02, 0,05, 0,1, a fim de desenvolver o escoamento do tipo ondular, e 1, 1,5 e 2 m/s, para desenvolver o *slug flow* e apenas uma velocidade para o ar para todas simulações, sendo de 6 m/s, com o intuito de encontrar e comparar os resultados de tensão para escoamentos com e sem a formação do *slug* em diferentes faixas de velocidade.

Figura 11: Plotagem das velocidades simulação no mapa de regime de escoamento de Taitel-Dukler.



Fonte: Autor (2023).



Representando através dos pontos, as três menores velocidades inseridas dentro do escoamento do tipo ondular, e as três maiores velocidades contidas no *slug flow*, totalizando as 6 simulações realizadas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA MÍNIMA DA BOMBA CENTRÍFUGA

Os dados obtidos do dimensionamento podem ser analisados conforme Tab. 2, o dimensionamento da bomba inicia a partir da seleção de componentes comerciais, no caso foi adquirido uma tubulação em acrílico de 30 mm de diâmetro externo com 4 mm de espessura. Trabalhando com o mapa de regime de escoamento desenvolvido por Taitel e Dukler (1976), afim de obter sua validação e atuar com uma potência de acionamento de uma bomba hidráulica comercial.

Considerando um número de Reynolds igual a 4000 referente a um escoamento turbulento, e considerando a água com 1,003 cSt de viscosidade cinemática, 1000 kg/m<sup>3</sup> de massa específica, e utilizando a Eq. 2, foi determinada uma velocidade de água de 0,183 m/s.

Aplicando o número de Reynolds também na Eq. 3 para obter o comprimento mínimo de tubulação para o escoamento ser completamente formado, obtendo um comprimento mínimo de 0,3856 m. Considerando um comprimento extra para que tenhamos uma seção de observação do regime do tipo *slug*, adquirindo então um comprimento total de 1,5 m.

Aplicando o número de Reynolds na Eq. 5, foi obtido um fator de atrito de 0,039735, e assim podendo calcular a perda de carga distribuída na tubulação conforme Eq. 4, resultando em 45,05 N/m<sup>2</sup> e uma perda de carga localizada devido a presença da válvula unidirecional de aproximadamente 1000 N/m<sup>2</sup>, calculando também a perda de carga referente à altura vertical necessária para a água atingir o nível da tubulação, conforme Eq. 6, resultando em uma perda de 9810 N/m<sup>2</sup>, somando todas as perdas de carga e totalizando em um perda total de 10855,05 N/m<sup>2</sup>.

Com todos dados do escoamento necessários obtidos, foi realizado o cálculo da vazão, conforme Eq. 7, sendo de  $6,93 \times 10^{-5}$  m<sup>3</sup>/s ou 4,16 lpm. Utilizando a



vazão na Eq. 8, é determinado a potência mínima necessária da bomba para suprir as perdas de cargas gerada pela bancada experimental de 0,75 W ou 0,001 cv.

Tabela 2: Dados de dimensionamento mínimo obtidos por meio das equações analíticas.

<b>Crítérios</b>	<b>Variáveis</b>	<b>Valores obtidos</b>	<b>Unidade de medida</b>
Tubulação	Diâmetro interno	0,02	m
	Comprimento	1,50	m
	Altura	1,00	m
Água	Viscosidade cinemática	1,00	mm <sup>2</sup> /s
	Massa específica	1000,00	kg/m <sup>3</sup>
Escoamento	Número de Reynolds	4000,00	-
	Velocidade	0,18	m/s
	Fator de atrito	0,04	-
	Perda de carga distribuída	45,05	Pa
	Perda de carga Localizada	1000,00	Pa
	Perda de carga altura	9810,00	Pa
	Perda de carga total	10855,05	Pa
Bomba	Vazão	4,16	lpm
	Potência de acionamento	0,75	W

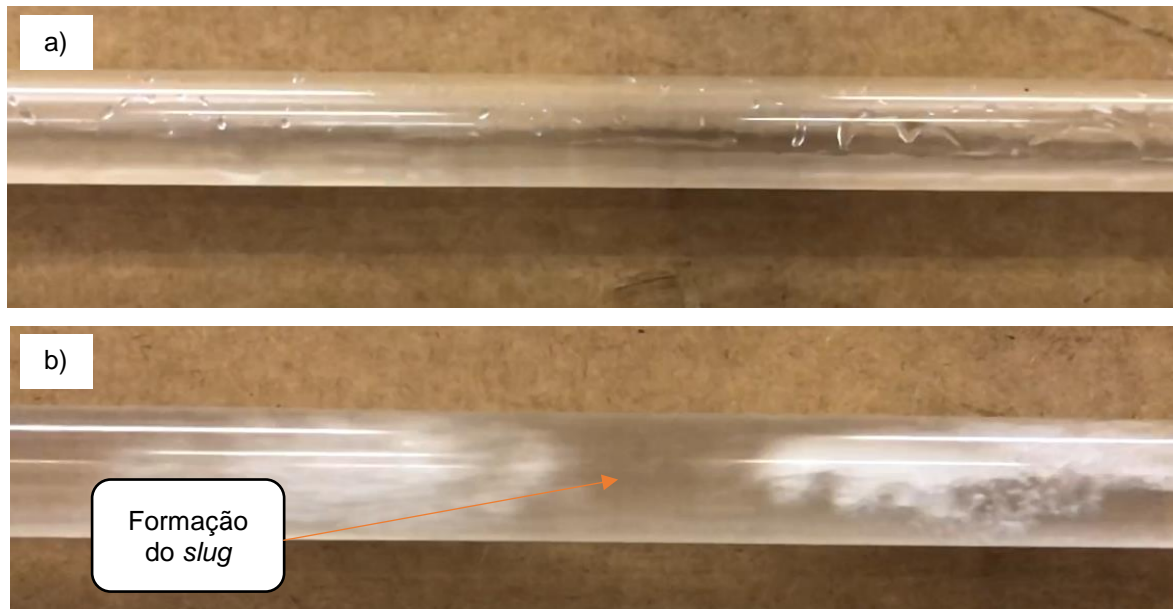
Fonte: Autor (2022).

#### 4.2 DESENVOLVIMENTO DO ESCOAMENTO MEDIANTE BANCADA EXPERIMENTAL

Com o intuito de apresentar o funcionamento da bancada experimental, e demonstrar a geração de diferentes tipos de regime de escoamento, foi relacionado algumas velocidades de entrada de água e ar para formação dos escoamentos do tipo ondular e do *slug flow*.

Os escoamentos desenvolvidos por meio da bancada experimental, foram analisados considerando as velocidades de entrada dos fluido ar e água a partir do mapa de regime de escoamento de Taitel e Dukler (1976). Afim de gerar um escoamento que não formasse o *slug*, Fig. 12a, e um escoamento que desenvolvesse o *slug*, Fig. 12b.

Figura 12: Desenvolvimento do escoamento mediante bancada experimental. a) Escoamento sem o desenvolvimento do *slug*. b) Escoamento que apresenta o desenvolvimento do *slug*.



Fonte: Autor (2023).

A Fig. 12a, utilizando a velocidade de água de 0,1 m/s e a velocidade de ar de 6 m/s, gerando um escoamento do tipo ondular com a água escoando suavemente de forma estratificada sem que haja a mistura dos fluido e não ocorra a formação do *slug*, diferente da Fig. 12b, que com o aumento da velocidade água para 1 m/s o escoamento altera sua formação e gerando o desenvolvimento do *slug*.

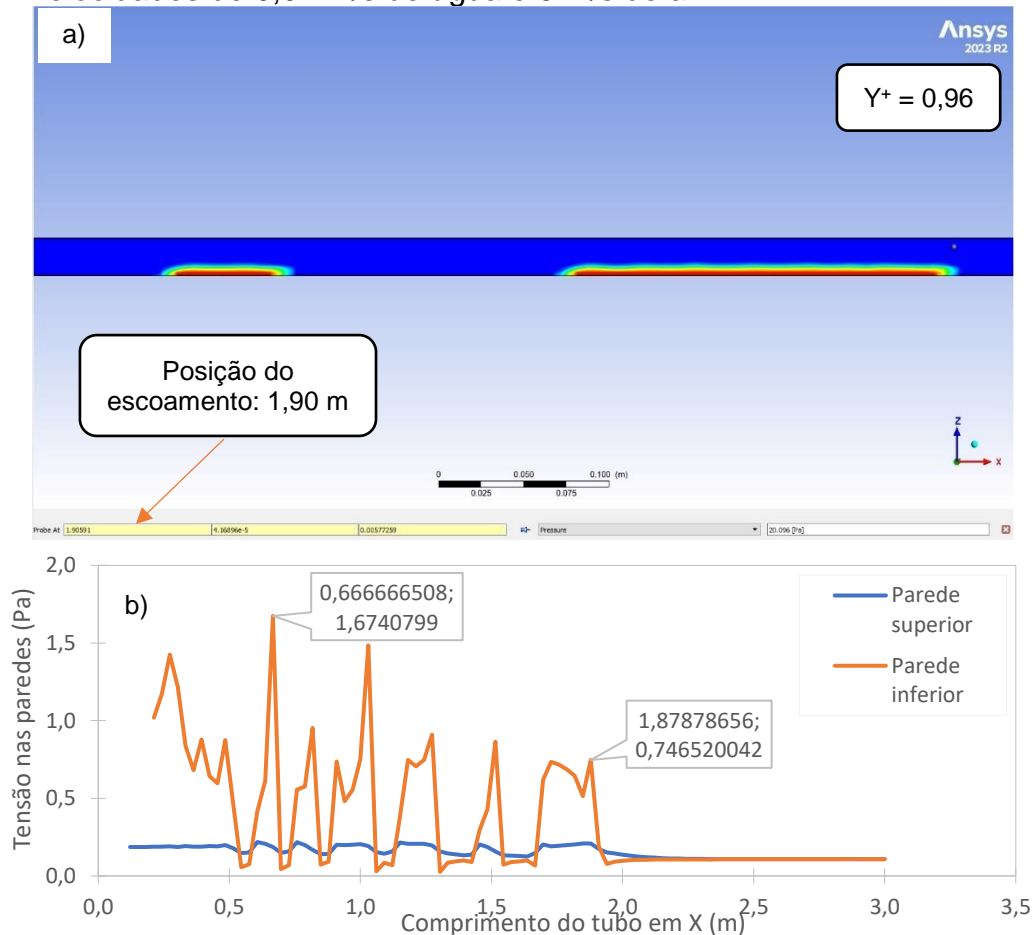
#### 4.3 ANÁLISE DO DESENVOLVIMENTO DO ESCOAMENTO MEDIANTE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL ANSYS

Com a realização de todas as simulações, foram capturadas as imagens do escoamento realizado, sendo a cor azul representando o ar e a cor vermelha o escoamento de água, e relacionando o posicionamento do escoamento com um gráfico de tensão de cisalhamento nas paredes superior e inferior do tubo ao longo de toda tubulação.

Os três primeiros ensaios foram realizados utilizando a entrada de água com 0,02, 0,05 e 0,1 m/s de velocidade e a entrada de ar com 6 m/s, referente ao escoamento do tipo ondular. De acordo com o mapa de escoamento de *Taitel e Dukler*

(1976), essas velocidades não formam o escoamento do tipo *slug*. Com as Fig. 13, nota-se que não houve a formação do *slug*.

Figura 13: Simulação de escoamento no software ANSYS® utilizando as velocidades de 0,02 m/s de água e 6 m/s de ar.



Fonte: Autor (2023).

As Fig. 13 juntamente com a simulação de um tempo total de 15 segundos de escoamento não apontaram o desenvolvimento do *slug*. Possui um  $Y^+$  de 0,96, que é a distância adimensional em relação a parede, dividida pela espessura da camada-limite.

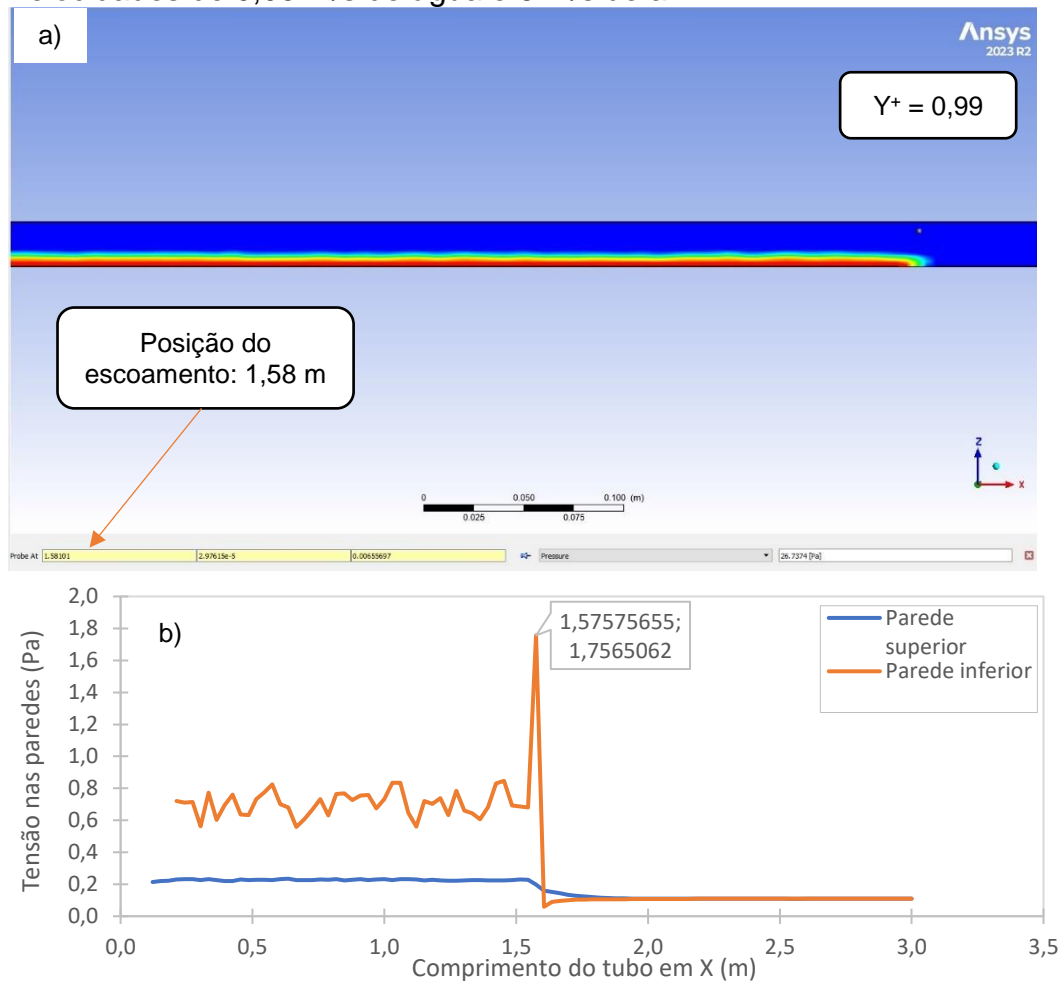
Fluxo turbulentos são significativamente afetados pela presença das paredes da tubulação, que são regiões afetadas pela viscosidade e apresentam grandes gradientes nas variáveis de solução, para este tipo de aplicação considera-se  $Y^+ < 30$  um valor coerente (SRIVASTAV, 2018).

A posição do escoamento de 1,90 m, representa a tensão de cisalhamento nas paredes superior e inferior em cada ponto do escoamento. A Fig. 13b demonstra

também que a tensão máxima desenvolvida foi de aproximadamente 1,67 Pa na parede inferior do tubo, sendo influenciada pela intersecção ar e água.

Aumentando a velocidade da água para 0,05 m/s, conforme as Fig. 14, pode-se observar um escoamento mais desenvolvido.

Figura 14: Simulação de escoamento no software ANSYS® utilizando as velocidades de 0,05 m/s de água e 6 m/s de ar.



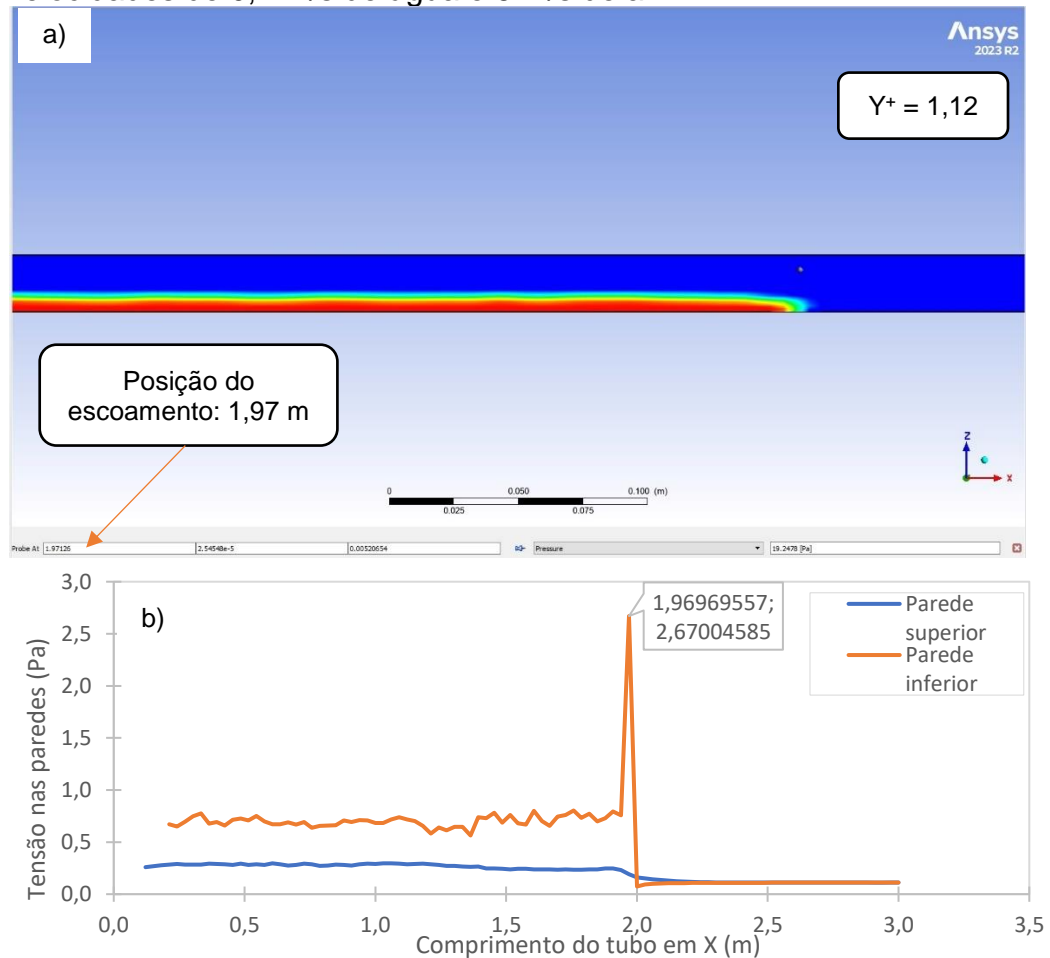
Fonte: Autor (2023).

A Fig. 14 apresenta um escoamento mais desenvolvido, porém ainda sem formação de *slug*. Possuindo um  $Y^+$  de 0,99 e o posicionamento do escoamento de 1,58 m pode ser comparado com a Fig. 14b que relaciona a tensão de cisalhamento ao longo do escoamento com a velocidade de água de 0,05 m/s.

Analisando a tensão de cisalhamento causada nas paredes do tubo, a Fig. 14b apresenta uma tensão máxima de 1,75 Pa na parede inferior da tubulação na posição de 1,57 m, local onde a volume de ar intersecciona o volume de água que está escoando.

Considerando uma velocidade de 0,1 m/s, as Fig. 15 apresentam a formação do escoamento causada por essa velocidade.

Figura 15: Simulação de escoamento no software ANSYS® utilizando as velocidades de 0,1 m/s de água e 6 m/s de ar.

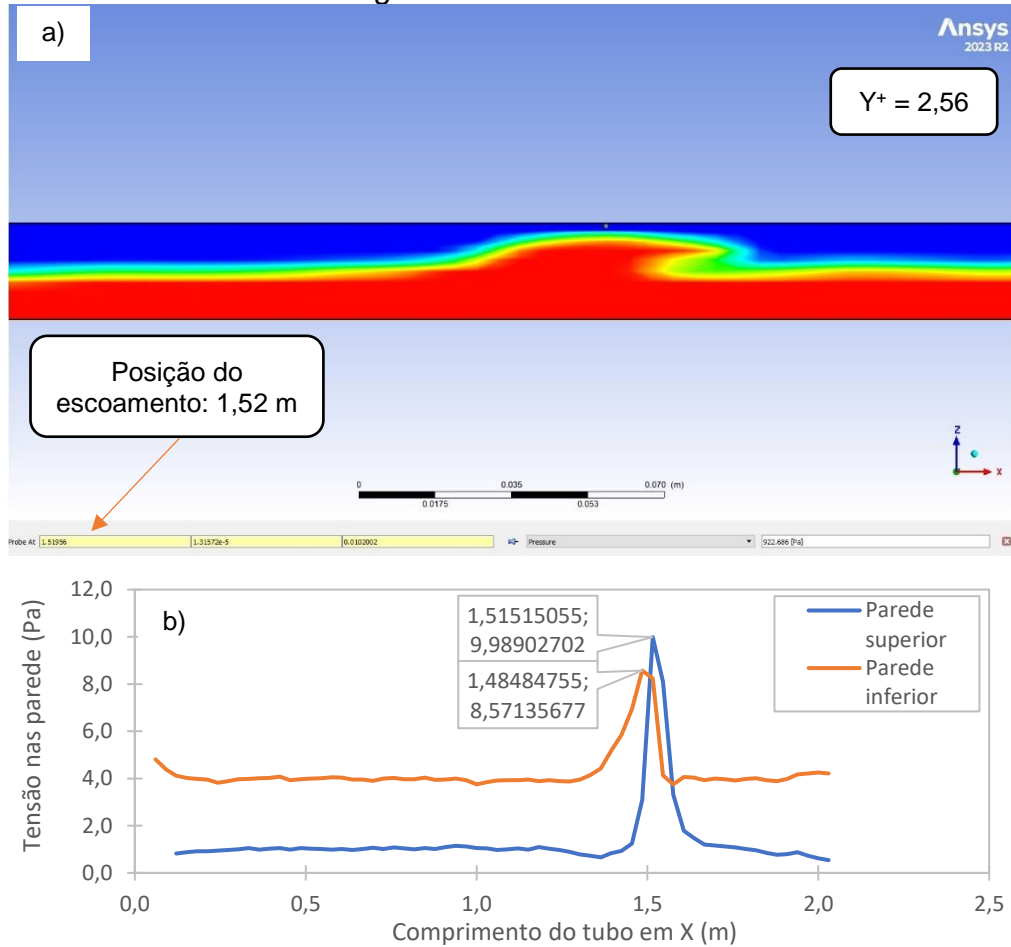


Fonte: Autor (2023).

A velocidade de 0,1 m/s de água não apresentou a formação do escoamento *slug*. Possui um  $Y^+$  de 1,12 e a posição do escoamento de 1,97 m apresentou uma tensão máxima de 2,67 Pa causada na parede inferior da tubulação no momento em que o volume de ar intersecciona o volume de água.

Aumentando a velocidade de entrada de água para 1 m/s para obtenção da formação do *slug*, conforme o mapa de escoamento de Taitel e Dukler (1976). As Fig. 16, apresentam a formação do *slug* com a utilização do software ANSYS®.

Figura 16: Simulação de escoamento no software ANSYS® utilizando as velocidades de 1 m/s de água e 6 m/s de ar.

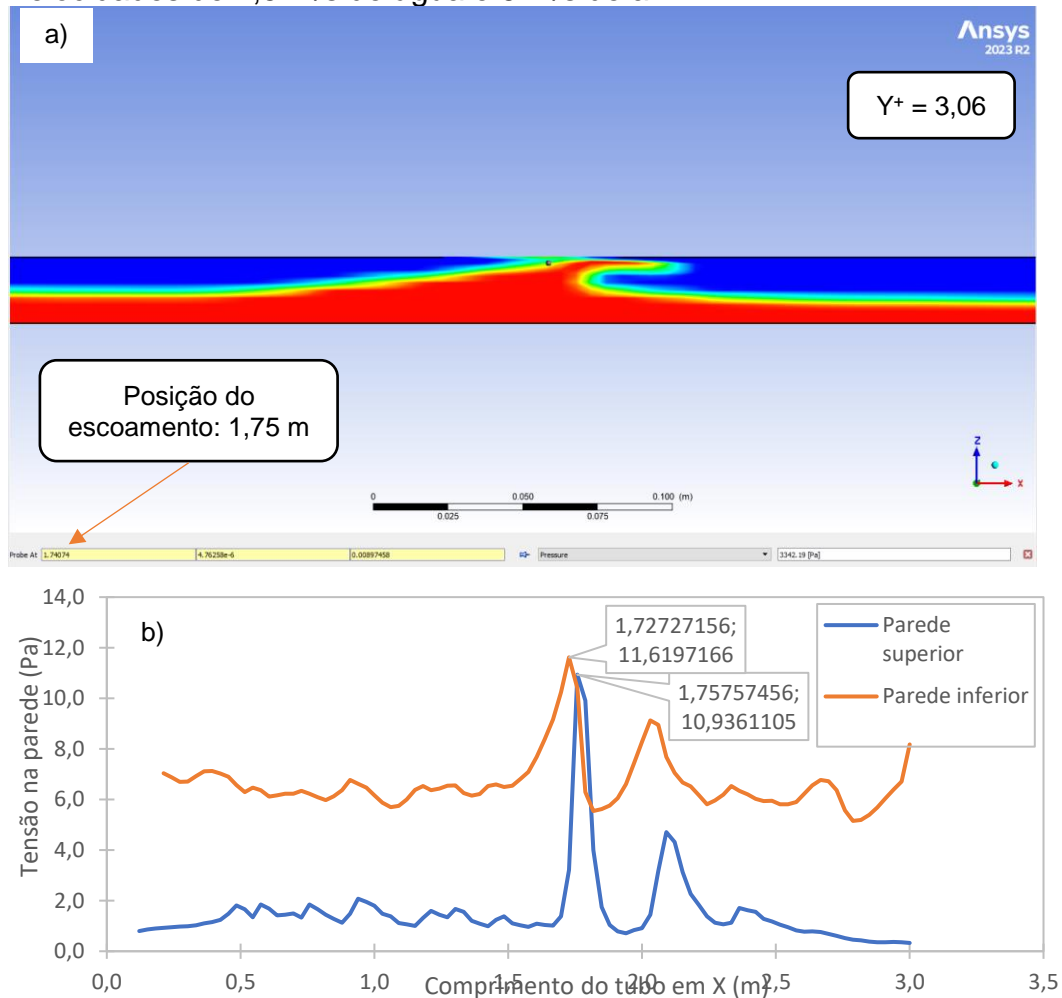


Fonte: Autor (2023).

A captura na posição de 1,52 m de comprimento do tubo, demonstra o início de formação do *slug*, possuindo um  $Y^+$  de 2,56. A Fig. 16, mostra também que a presença do *slug* causa uma variação da tensão de cisalhamento nas paredes da tubulação, totalizando numa tensão próxima de 10 Pa na parede superior do tubo, e causando 8,57 Pa na parede inferior do tubo.

Através das Fig. 17 é possível observar a formação do *slug* utilizando a velocidade de 1,5 m/s de água e 6 m/s de ar.

Figura 17: Simulação de escoamento no software ANSYS® utilizando as velocidades de 1,5 m/s de água e 6 m/s de ar.



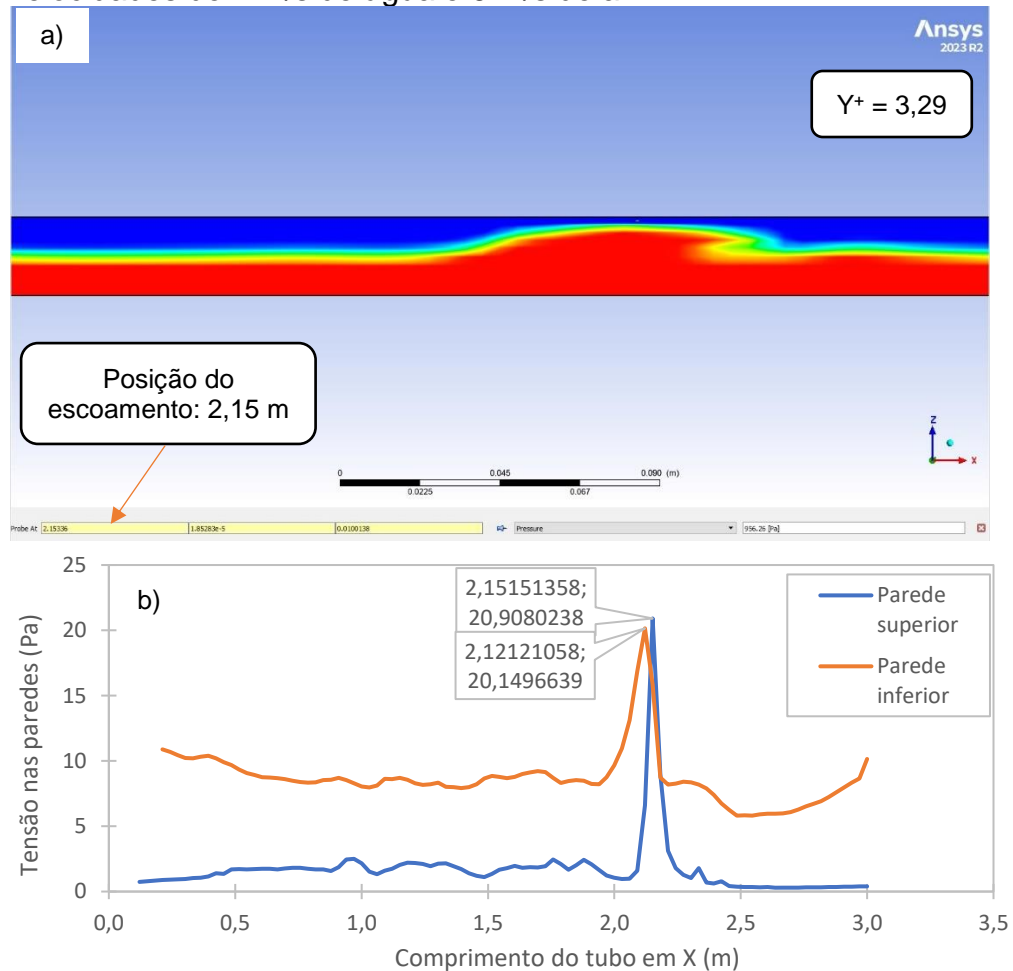
Fonte: Autor (2023).

A simulação referente as faixas de velocidades de 1,5 e 6 m/s de água e ar respectivamente, exibe a formação do *slug* na posição de 1,75 m de comprimento do tubo e um  $Y^+$  de 3,06. Com a Fig. 17, pode-se notar que a presença do *slug* causa uma variação na tensão de cisalhamento presente na parede da tubulação.

A Fig. 17b demonstra também que no momento em que a formação do *slug* passa pelo posicionamento causa uma maior tensão tanto na parede superior no tubo quando na parte inferior. Na parede superior tem-se um pico de 10,93 Pa de tensão de cisalhamento, um valor significativo comparado ao resto da tensão nos outros posicionamentos ao longo de todo o comprimento do tubo, que atingem valores próximos a 2 Pa. A parede inferior apresentou um pico aproximado de 11,62 Pa, um pico um pouco maior que a parede superior por conta da fração de volume de água.

Aumentando a velocidade da água para 2 m/s, a simulação, Fig. 18, apresenta uma formação de escoamento mais tardia.

Figura 18: Simulação de escoamento no software ANSYS® utilizando as velocidades de 2 m/s de água e 6 m/s de ar.



Fonte: Autor (2023).

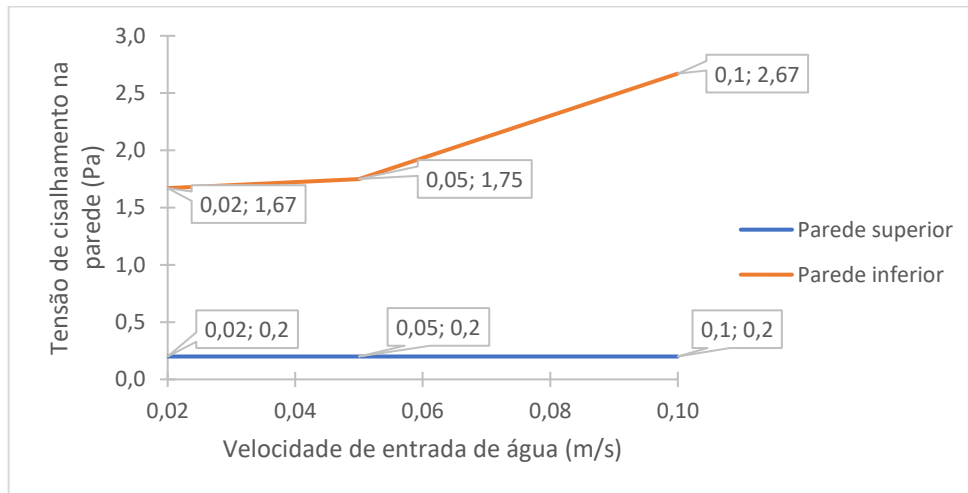
A formação do *slug* atuando com uma velocidade de água de 2 m/s ocorreu na posição de 2,15 m do comprimento da tubulação, e possuindo um  $Y^+$  de 3,29. Conforme a Fig. 18, a maior velocidade da água acabou gerando uma maior tensão de cisalhamento nas paredes do tubo.

O aumento da tensão de cisalhamento nas paredes da tubulação decorrente do aumento de velocidade de entrada da água, de acordo com a Fig. 18b, apresentou um aumento para 20,9 Pa na parede superior do tubo. Já a parede inferior do tubo, apresentou uma tensão de cisalhamento de aproximadamente 20,15 Pa.



Realizando uma comparação referente as simulações realizadas do escoamento do tipo ondular, a Fig. 19 apresenta um gráfico que relaciona as tensões máximas em ambas as paredes em relação a cada velocidade simulada.

Figura 19: Gráfico de comparação das tensões de cisalhamento máximas obtidas em cada velocidade referente ao escoamento do tipo ondular.



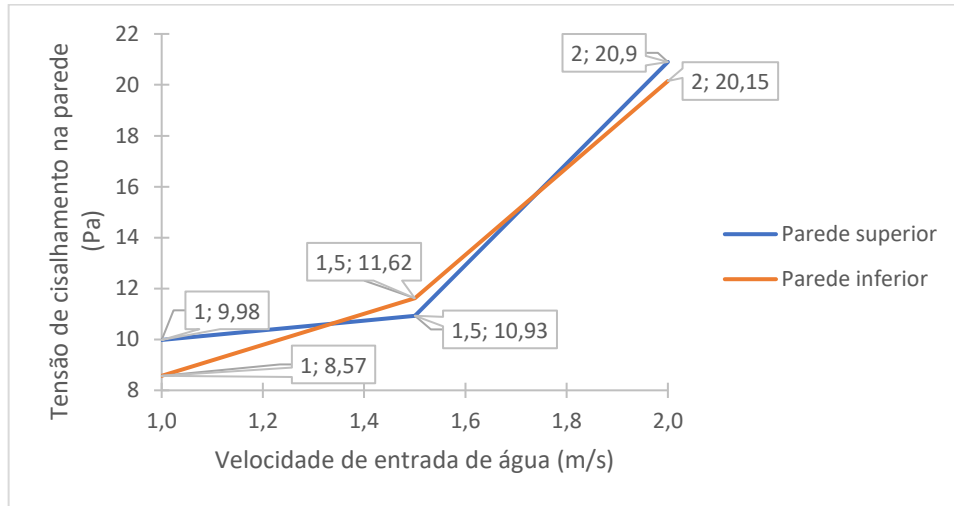
Fonte: Autor (2023).

Conforme a Fig. 19, a tensão de cisalhamento nas velocidades de 0,02, 0,05 e 0,1 m/s na parede superior se manteve constante em 0,2 Pa, por conta do escoamento constante do ar na região superior, dessa maneira, não houve interferência da água nessa região. Já na parede inferior, conforme o aumento de velocidade de entrada de água a tensão de cisalhamento na parede inferior também foi aumentando, porém não de forma linear.

A tensão na parede superior é menor devido principalmente a viscosidade do ar de 0,0181 cSt a 20 °C que é significativamente menor que a da água que tem a viscosidade igual a 1,003 cSt.

Comparando as velocidades referente ao *slug flow*, a Fig. 20 apresenta um gráfico que relaciona as tensões de cisalhamento máximas referente a cada velocidade simulada desse tipo de escoamento.

Figura 20: Gráfico de comparação das tensões de cisalhamento máximas obtidas em cada velocidade referente ao *slug flow*.



Fonte: Autor (2023).

De acordo com a Fig. 20, a presença do *slug* no escoamento gera picos de tensão de cisalhamento em ambas as paredes, diferente do escoamento do tipo ondular. Com o aumento da velocidade da água as tensões nas paredes superior e inferior também sofrem um aumento.

Em análise a Eq. 1, que relaciona o gradiente de velocidade com a viscosidade do fluido resultando em uma tensão de cisalhamento, sendo variáveis diretamente proporcionais.

Assim como sugere os resultados das simulações desenvolvida, em paralelo com a Eq. 1, o aumento do gradiente mediante o aumento de velocidade de entrada da água associado à sua viscosidade causa uma maior tensão de cisalhamento nas paredes da tubulação.

Comparando as Fig. 19 e 20, o aumento significativo da tensão da parede superior é devido a formação do *slug* que faz com que a água entre em contato com a parte superior do tubo, e mediante sua viscosidade cinemática, realiza a força uma força de arrasto maior que a do ar.

## 5 CONCLUSÃO

Com as simulações realizadas no *software ANSYS®*, os escoamentos que apresentaram a formação do *slug* apresentaram picos significativos de tensão de



cisalhamento em ambas as paredes superior e inferior do tubo, valores que aumentam conforme ocorre o aumento da velocidade de entrada de água, porém não de forma linear.

De acordo com os resultados obtidos, quanto maior a velocidade de entrada da água maior será a tensão causada nas paredes do tubo, mas o escoamento se formará em um posicionamento mais tardio. A velocidade de água de 2 m/s causou uma tensão máxima de aproximadamente 20 Pa na parede superior e inferior, valor maior que 100% se comparado com os valores de tensão no resto do escoamento em que não está ocorrendo o *slug*.

A velocidade de água de 2 m/s apresentou também uma tensão de praticamente 780% maior que os escoamentos que não desenvolveram o *slug* que são as velocidades de água igual a 0,02, 0,05 e 0,1 m/s que apresentaram uma tensão de cisalhamento máxima de 2,67 Pa. E um ganho de 100% e 80%, comparado as velocidades de 1 m/s e a velocidade de 1,5 m/s, respectivamente, que também desenvolveram o escoamento do tipo *slug*, porém atingiram as tensões de cisalhamento máxima equivalente a 11,6 e 10 Pa.

Dessa maneira, o aumento da velocidade de água gera um aumento na tensão de cisalhamento na parede inferior, e com a utilização *slug flow* aumenta também a tensão de cisalhamento na parede superior do tubo.

O *slug* formado causa uma maior tensão de cisalhamento estando diretamente ligada a velocidade de entrada da água, do ar e também da viscosidade de ambos. Dessa forma, explorar outras faixas de velocidade tanto de água quanto de ar, podem gerar ganhos ainda mais significativos de tensão de cisalhamento nas paredes do tubo. Outra contribuição para pesquisa e obtenção de novos resultados, seria a substituição da água por um fluido com uma viscosidade maior, como é o caso de óleos.

## REFERÊNCIAS

ABNT – NBR 10396. “Medidores de Vazão e Fluidos”. Rio de Janeiro, BR, 1988.

AL-HASHIMY, Zahid; et. al, 2016, “Numerical characterisation of slug flow in horizontal air/water pipe flow”, International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements, Vol. 4, N. 2, pp. 114-130.



ASTM D6439 – 99, Cleaning, Flushing and Purification of Steam, Gas, and Hydroelectric Turbine Lubrication Systems. West Conshohocken, PA, 1999.

BONIZZI, M. Transient One-Dimensional Modeling of Multiphase Slug Flows. London: Imperial College London. Doc.S.Dissertation, 2003.

ÇENGEL, Yunus; CIMBALA, John. “Mecânicas dos fluídos. Fundamentos e aplicações”. Ed. Mc Gran Hill Education, 3rd Edition. Nevada, 2015. 995p.

FILTROVALI. Flushing com água industrial. 2022. Disponível em: <https://www.filtrovali.com.br/servico-de-flushing-com-oleo-industrial-primario-e-secundario/>. Acesso em: 12 set 2022.

FOX, Robert; MCDONALD, Alan. “Introdução a Mecânica dos Fluídos”. Ed. LTC, 6ª edição, Rio de Janeiro, 2006. 816p.

KANIZAWA, Fabio., 2011, “Estudo teórico e experimental sobre padrões de escoamento e perda de pressão durante escoamentos monofásicos e bifásicos no interior de tubos com fitas retorcidas” Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo – USP, São Carlos/SP, Brasil, 231p.

LAGES, Eduardo. 2019, “Viscosidade”, Revista de ciência elementar, Vol. 6, N. 4, Universidade do Porto, pp 11-12.

LINSIGEN, Irlan. “Fundamento de Sistemas Hidráulicos”. Ed. Edusfc, 5ª edição. Florianópolis, 2016, 398p.

MANEGHINI, Cristiano., 2014, “Caracterização Experimental do Escoamento em Padrão *Slug* em Dutos Verticais com e sem Bolhas Dispersas” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis/SC, Brasil, 192p.

MATIAS, Felipe; et al. Software Para Dimensionamento De Sistemas Hidráulicos Aplicados Ao Escoamento Em Tubulações. 2013.

OLIVEIRA, Luis; LOPES, António. “MECÂNICA dos Fluidos”. Ed.ETEP, 3ª edição. Lisboa, 2010, 766p.

ORTEGA, Arturo; NIECKELE, Angela. “Simulation Of Horizontal Pipe Two-Phase Slug Flows Using The Two-Fluid Model”. In: Rio Pipeline Conference & Exposition, October, 17-19, 2005, Rio de Janeiro, RJ, Brazil.

PIERNAS, Rodrigo; SIDNEY, Jefferson; ANTÔNIO, Gilberto. Extensometria básica. 2004. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariacivil/nepae/extensometria-basica.pdf>. Acesso em: 09 mar 2023.



POURCEL, Florent; DUCHESNE, Sophie. Slug flow simulation, a way to improve air scouring of water mains? Water Distribution System Analysis 2016. Cartagena das Índias, v.11, p.2, 2016.

SRIVASTAV, Vivek; PAUL, Akshoy; JAIN, Anuj. "Capturing the wall turbulence in CFD simulation of human respiratory tract". Mathematics and Computers in Simulation Vol. 160, Jun. 2019, pp 23-38.

SUTHERLAND, Ken. "Filters and Filtration". Ed. Butterworth Heinemann, 5th Edition. Hungary, 2008, 523p.

WHITE, Frank. "Viscous Fluid Flow". 2nd Edition. McGraw Hill, 2006, 616p.

### LISTA DE SÍMBOLOS

$\tau_{yx}$ : Tensão de cisalhamento em x ( $N/m^2$ );

$du/dy$  : Gradiente de velocidade ou taxa de cisalhamento ( $s^{-1}$ );

$\mu$ : Viscosidade do fluido (Pa.s);

Re: Número de Reynolds (---);

$V$ : Velocidade média do fluido (m/s);

D: Diâmetro da tubulação (m);

$\nu$ : Viscosidade cinemática do fluido ( $m^2/s$ );

$L_e$ : Comprimento de escoamento (m);

d: Diâmetro interno da tubulação (m);

$h_f$ : Perda de carga em pressão ( $N/m^2$ );

f: Fator de atrito (---);

L: Comprimento da tubulação (m);

V: Velocidade do fluido (m/s);

$\rho$ : Massa específica ( $kg/m^3$ );

$\Delta P$ : Perda de carga em pressão ( $N/m^2$ );

g: Aceleração gravitacional ( $m/s^2$ );

h: Altura vertical (m);

Q: Vazão volumétrica ( $m^3/s$ );

A: Área da tubulação ( $m^2$ );

Na: Potência de acionamento (W);

P: Soma de todas perdas de carga (Pa).