

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

RAMON PERUCHI PACHECO DA SILVA

**ANÁLISE DE ESCOAMENTOS GÁS-LÍQUIDO EM TUBULAÇÕES A PARTIR DE
ECT**

Joinville

2017

RAMON PERUCHI PACHECO DA SILVA

**ANÁLISE DE ESCOAMENTOS GÁS-LÍQUIDO EM TUBULAÇÕES A PARTIR DE
ECT**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval no Curso de Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Prof. Jorge Luiz Goes Oliveira, PhD.

Joinville

2017

**ANÁLISE DE ESCOAMENTOS GÁS-LÍQUIDO EM TUBULAÇÕES A PARTIR DE
ECT**

RAMON PERUCHI PAGHECO DA SILVA

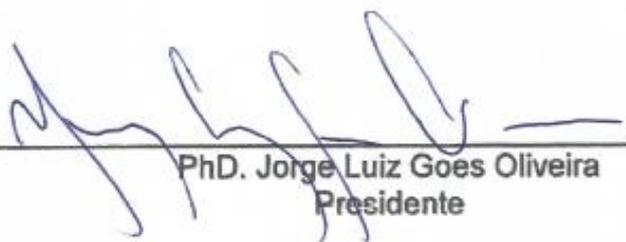
Esta monografia foi julgada adequada para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, e aprovada em sua forma final pelo Curso de Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville, 22 de novembro de 2017.



Dr. Luis Fernando Peres Caill
Coordenador do Curso

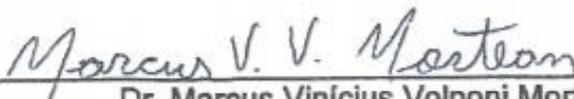
Banca Examinadora:



Ph.D. Jorge Luiz Goes Oliveira
Presidente



Dr. Kleber Vieira de Paiva
Membro



Dr. Marcus Vinícius Volponi Morteau
Membro

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a minha família por todo o apoio durante toda a minha vida e especial durante o período do curso. Obrigado pai e mãe.

Agradeço a Tainara por sempre estar ao meu lado, ajudando a me dedicar e nunca me sentir desmotivado.

Ao meu orientador Professor Jorge Luiz, pela paciência e apoio na execução deste trabalho.

Ao CNPq e a Petrobras pelo apoio ao trabalho.

Ao grupo T2F, especialmente, Prof. Kleber Paiva, Jim, Leonel, Andrei e ao ex-membro Rafael, por proporcionar momentos de grande sabedoria.

RESUMO

Escoamentos gás-líquido em tubos ocorrem em inúmeras atividades industriais como, por exemplo, na indústria de óleo e gás. A medição em tempo real de escoamentos gás-líquido pode gerar redução de custo, aumento da produtividade e melhora da qualidade de produção. O objetivo deste trabalho é a avaliação de escoamentos bifásicos líquido-gás a partir do tratamento estatístico de dados obtidos por tomografia. Visando recriar em laboratório misturas de gases e líquidos em situações práticas, foi projetada uma bancada multifásica para água, óleo e ar. Com o objetivo de analisar escoamentos em placas do trocador de calor PSHE. A bancada terá temperatura controlada na faixa entre 5 e 70 °C, e pressão máxima de mistura de 37 psi. Um código computacional foi implementado para o tratamento estatístico de escoamentos bifásicos turbulentos a partir dos dados de medição do tomógrafo. Testes preliminares foram realizados a partir de um experimento em uma bancada simplificada para testar o código criado. O código permite a utilização de um filtro de dados para retirada de dados espúrios de forma a melhorar a precisão de cálculo para o campo de concentração, velocidade, vazão mássica e volumétrica.

Palavra-chave: Turbulência; escoamentos gás-líquido; tomografia; bancada multifásica.

ABSTRACT

Liquid-gas flows in pipes occur in several industries, particularly in oil and gas fields. Online measurements may allow cost reduction and production increase in oil sites. This work aims at evaluating liquid-gas flows by statistical treatment of an Electrical Capacitance Tomography (ECT) data. To mimic multiphase flows in laboratory for practical situations, an experimental setup is designed for air, oil and water streams. The aim is the analysis of the plate of a PSHE heat exchanger. Flow temperature and pressure can vary in the range 5-70 oC, and up to 37 psi. A numerical code was implemented to assess turbulent gas-liquid flows by means of ECT data. Preliminary code appraisal was performed by experiments in a simplified setup. The numerical code allows data filtering in order to improve computation of concentration, velocity, mass and volume flow rate fields.

Keywords: Turbulence; gas-liquid flows tomography; multiphase flow setup.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Placas de tamanhos distintos do trocador PSHE.	17
Figura 2 – Tipos de bombas hidráulicas.	19
Figura 3 – Rotores de turbo-bombas: fechado, semiaberto e aberto, respectivamente.	20
Figura 4 – Compressor Centrífugo CSV 8,2/25 – 2 HP 21	21
Figura 5 – Filtros de ar com purgador para remoção de óleo.	22
Figura 6 – Válvula globo de tampa roscada BSP ou NPT.	23
Figura 7 – Configuração da válvula globo fechada (vista a) e aberta (vista b).	23
Figura 8 – Válvula de retenção horizontal com portinhola.	24
Figura 9 – Válvula redutora de pressão P25.	24
Figura 10 – Linhas de correntes de escoamento laminar e turbulento.	25
Figura 11 – Padrões de escoamento horizontais.	37
Figura 12 – Mapa de padrões de escoamento horizontais de Baker (1954) 38	38
Figura 13 – Disposição dos eletrodos para a medição da capacitância.	40
Figura 14 – Arranjo dos pixels na área seccional do tomógrafo.	40
Figura 15 – Representação da resolução espacial do ECT.	41
Figura 16 – Reconstrução tridimensional realizada no software <i>Flowan</i>	42
Figura 17 – Configuração dos equipamentos do ECT.	42
Figura 18 – Esquemático da bancada de testes multifásica, adaptada para alimentar um canal de um trocador de calor PSHE.	44
Figura 19 – Visão Frontal e superior do esquemático da linha de gás.	45
Figura 20 – Visão frontal e superior do esquemático da linha de óleo.	46
Figura 21 – Vista isométrica do misturador projetado.	47
Figura 22 – Vista isométrica do esquemático da linha bifásica, contendo equipamento do ECT.	48
Figura 23 – Curvas características das bombas BC-91 com potência de 1, $\frac{3}{4}$ e $\frac{1}{2}$ cv.	51
Figura 24 – Componentes da bancada de testes simplificada para geração de dados bifásicos.	52
Figura 25 - Diagrama com os dados de saída do programa realizado no MATLAB para o tratamento de dados, com exceção dos gráficos.	56

Figura 26 - Diagrama com os gráficos gerados pelo programa através do MATLAB possibilita que o usuário consiga sua visualização.	56
Figura 27 – Configuração do arquivo de saída da plataforma <i>Flowan</i>	57
Figura 28 – Mapa para padrão de escoamento estratificado (1) e anular (2).....	57
Figura 29 – Interface gráfica para o usuário. O programa foi concebido para o tratamento estatístico de escoamentos bifásicos.	58
Figura 30 – Fluxograma do funcionamento do algoritmo implementado.....	59
Figura 31 – Visualização do escoamento nos tempos 8, 11 e 17,5 segundos, respectivamente.	61
Figura 32 – Região provável no mapa de padrões onde o experimento foi realizado.	61
Figura 33 – Reconstrução tridimensional do escoamento realizado no Flowan.....	62
Figura 34 – Representação das concentrações instantâneas nos tempos 9, 11 e 17,5 segundos a partir do presente programa de análise.	63
Figura 35 – Dados de entrada do programa.	63
Figura 36 – Dados gerais de saída do programa.	64
Figura 37 – Perímetro molhado médio geral e durante os tempos t_1 e t_2	65
Figura 38 – Concentrações do plano 1, plano 2 e média do escoamento medido em toda a seção transversal	67
Figura 39 – Concentrações nos planos 1 e 2 (verde e vermelho) e vazão volumétrica (rosa) uma região média superior da seção transversal.	68
Figura 40 – Perfil de velocidade médio teórico laminar e turbulento (a) e medido (b).	69
Figura 41 – Vazão volumétrica do escoamento medido.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores do coeficiente C para as equações 39 e 40.	36
Tabela 2 – Principais componentes e características referentes à tubulação da bancada multifásica.....	48
Tabela 3 – Válvulas e Filtro usados na bancada.....	49
Tabela 4 – Descrição dos principais equipamentos e componentes da bancada de testes e suas quantidades.....	50
Tabela 5 – Resumo dos dados de saída do programa, contendo parâmetros em um intervalo selecionado, no pixel de estudo e neste mesmo pixel no intervalo selecionado.	66

LISTA DE ABREVIATURAS

CMU – Capacitance Measurement Unity (Unidade de Medição de Capacitância)

DNS - Direct Numerical Simulation

ECT - Electric Capacitance Tomography (Tomografia por capacitância elétrica)

LES - Large Eddy Simulation

PIV – Particle Image Velocimetry (Velocimetria por imagem de partículas)

PSHE - Plate and Shell Heat Exchanger (Trocador de calor Casco-Placas)

PVC - Polyvinyl chloride (Policloreto de Vinila)

RANS - Reynolds Average Navier-Stokes Equations

VFR - Válvula de Fechamento Rápido

LISTA DE SÍMBOLOS

Alfabeto Latino

- a – Corrente média em relação ao terra [A]
 A - Área total da seção transversal do tubo [m²]
 A_l - Área da seção transversal do tubo ocupada pelo líquido [m²]
 A_g - Área da seção transversal do tubo ocupada pelo gás [m²]
 A_i – Área do pixel i [m²]
 C_1 – Concentração no plano 1
 C_2 – Concentração no plano 2
 C_i – Concentração no pixel i
 C_f - Coeficiente de fricção
 C_t – Coeficiente do modelo de turbulência $k-\varepsilon$
 D – Diâmetro do tubo [m]
 D_e - Diâmetro da esfera hipotética [m]
 Em – Eletrodo emissor
 Er – Eletrodo Receptor
 G - Fluxo mássico total [kg.s⁻¹.m⁻²]
 G_g - Fluxo mássico da fase gasosa [kg.s⁻¹.m⁻²]
 G_l - Fluxo mássico da fase líquida [kg.s⁻¹.m⁻²]
 J_l - Velocidade superficial do líquido [m/s]
 J_g - Velocidade superficial do gás [m/s]
 k – Energia cinética turbulenta [m²/s²]
 L_s – Distância entre sensores [m]
 l – Comprimento do sensor [m]
 m – Vazão mássica total do escoamento [kg/s]
 m_l – Vazão mássica líquida [kg/s]
 m_g – Vazão mássica gasosa [kg/s]
 Nu – Número de Nusselt
 n – Vetor normal unitário
 \mathcal{P} – Produção de energia cinética turbulenta [N/m²]
 P – Pressão [N/m²]

p – Pressão modificada [N/m²]
 Pr – Número de Prandtl
 Q_l - Vazão volumétrica do líquido [m³/s]
 Q_g - Vazão volumétrica do gás [m³/s]
 q_i - Vazão volumétrica no pixel i [m³/s]
 R - Raio dos pixels mais próximos a parede do tubo [m]
 $R_{xy,i}$ - Correlação cruzada no plano xy na área i .
 r – Raio do tubo [m]
 \check{r} – Raio dos pixels adjacentes aos próximos da parede do tubo [m]
 Re – Número de Reynolds
 S - Fator de escorregamento entre as fases
 S_{ij} – Taxa do tensor tensão [N.m⁻².s⁻¹]
 \bar{S}_{ij} – Média da taxa do tensor tensão [N.m⁻².s⁻¹]
 t – Tempo [s]
 t_f – Tempo final de análise [s]
 U_i – Velocidade no pixel i [m/s]
 U – Velocidade [m/s]
 U_l – Velocidade da fase líquida [m/s]
 U_g – Velocidade da fase gasosa [m/s]
 \bar{U} – Velocidade média [m/s]
 u – Flutuação da velocidade [m/s]
 u_η – Velocidade de Kolmogorov [m/s]
 $\langle u_i u_i \rangle$ - Tensão de Reynolds [m²/s²]
 V - Velocidade das estruturas do fluxo [m/s]
 V_s – Tensão da fonte alternada [V]
 w – Água
 x – Coordenada Cartesiana
 x_t – Título de gás
 y – Coordenada Cartesiana
 X^2 - Parâmetro modificado de Lockhart-Martinelli
 z – Comprimento do tubo

Alfabeto Grego

α – Fração de vazio

β – Distância entre os centros de pixels adjacentes [m]

γ - Difusividade térmica [m²/s]

δ_{ij} - Delta de Kronecker

ε – Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta [m²/s³]

η – Comprimento de Kolmogorov [μm]

θ - Ângulo do duto [rad]

λ – Parâmetro de Bake

μ – Viscosidade dinâmica [Pa.s]

μ_l – Viscosidade dinâmica do líquido [Pa.s]

μ_g – Viscosidade dinâmica do gás [Pa.s]

ν – Viscosidade cinemática [m²/s]

ν_t – Viscosidade turbulenta [m²/s]

ρ – Massa específica [kg/m³]

ρ_g – Massa específica da fase gasosa [kg/m³]

ρ_l – Massa específica da fase líquida [kg/m³]

σ – Tensão superficial [N/m²]

σ_U – Desvio padrão da velocidade

τ_w - Tensão de cisalhamento na parede [N/m²]

τ_{ij} – Tensor tensão [N/m²]

τ_η – Tempo de Kolmogorov [10⁻³s]

τ - Tempo de trânsito [s]

Φ_{lo}^2 - Multiplicador bifásico considerando a vazão total como sendo líquido

Φ_l^2 - Multiplicador bifásico considerando somente a fase líquida

Φ_g^2 - Multiplicador bifásico considerando somente a fase gasosa

Ψ – Potencial gravitacional

ψ - Parâmetro de Baker

Ω_{ij} - Taxa do tensor rotação [N/m²*s]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	Objetivo Geral	18
1.1.2	Objetivos Específicos	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	ELEMENTOS MECÂNICOS	19
2.1.1	Bomba hidráulica	19
2.1.2	Compressor	20
2.1.3	Filtro	21
2.1.4	Válvulas	22
2.1.4.1	Globo	22
2.1.4.2	Retenção	23
2.1.4.3	Redutora de pressão	24
2.2	ESCOAMENTO TURBULENTO	25
2.2.1	Equações de movimento do fluido	27
2.2.2	Parâmetros de turbulência e número de Nusselt	29
2.2.3	Modelo de turbulência	31
2.3	ESCOAMENTO BIFÁSICO	32
2.3.1	Conceitos básicos	32
2.3.2	Modelo de fases	35
2.3.3	Padrões de escoamento	36
2.3.4	Mapas de padrões	38
2.4	TOMOGRAFIA DE CAPACITÂNCIA ELÉTRICA	39
3	PROJETO DA BANCADA MULTIFÁSICA	43
3.1	PROJETO MECÂNICO	43
3.1.1	Linha de gás	45
3.1.2	Linha de óleo	46
3.1.3	Linha bifásica	47
3.2	DESCRIÇÃO DOS PRINCIPAIS COMPONENTES	48
3.2.1	Tubulação	48
3.2.2	Válvulas e filtro	49

3.2.3	Equipamentos	50
3.3	FAIXAS TERMODINÂMICAS E DE OPERAÇÃO.....	50
4	PROCESSAMENTO DE DADOS DO TOMÓGRAFO.....	52
4.1	ALGORITMO DE PROCESSAMENTO DE DADOS.....	53
4.2	DETALHAMENTO DA PROGRAMAÇÃO	55
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
5	CONCLUSÃO	70
6	REFERÊNCIAS.....	72
7	ANEXO A – COTOVELO, TÊ E TUBOS.....	78
8	ANEXO B – FLANGE ANSI B16.5 CLASSE 150.....	81
9	APÊNDICE A – PIXELS ADJACENTES À PAREDE	82
10	APÊNDICE B – CÓDIGO FONTE DA ANÁLISE DO ESCOAMENTO ...	83

1 INTRODUÇÃO

Escoamentos bifásicos líquido-gás são típicos em diversas áreas, como, por exemplo, na indústria de petróleo e gás, refrigeração, geradores de vapor, condicionadores de ar, condensadores e bombas de calor. O transporte via dutos é uma prática antiga. Algumas civilizações, como astecas, chineses, gregos e egípcios, já o utilizavam para transporte de fluidos com diferentes materiais (SOUZA, 2009). Segundo Falcone *et al.* (2002), medições de vazão de escoamento que contém mais de uma fase tem grande importância para a indústria petrolífera. Citam-se como exemplos o gerenciamento de reservatórios, a estocagem, o controle de produção e o controle em tempo real das linhas de produção.

Nas últimas duas décadas, a indústria de petróleo e gás intensificou o desenvolvimento de novos equipamentos de medição como forma de substituição aos convencionais separadores de fases (OLIVEIRA, 2007) com o objetivo de reduzir equipamentos, espaço ocupado e custos. A medição bifásica também descreve instantaneamente a taxa de produção, transientes de pressão e condições de poço, enquanto separadores resultam em medições em tempos discretos.

Os escoamentos bifásicos também podem ser encontrados em equipamentos como trocadores de calor, necessários ao condicionamento térmico das linhas de produção em petrolíferas. Menciona-se como exemplo o novo trocador constituído de placas circulares corrugadas soldadas (ver Figura 1), denominado de trocador de calor casco-placas (PSHE). Este dispõe de canais internos de entrada e saída de fluido conectados por *manifolds*. Em sua fração de ramal externa, o fluido é difundido para os canais através de um bocal. O PSHE possui particularidades comuns ao trocador casco-tubo e placas (PAIVA *et al.*, 2017). Entretanto, o uso do trocador PSHE na produção é recente, carecendo de pesquisa. Em altas vazões, por exemplo, vibrações adversas podem ocorrer danificando elementos como conectores; ver Klemes *et al.* (2016).

Para conceber escoamentos similares aos da produção de óleo e gás, será apresentado um projeto de bancada multifásica (Figura 18), contendo linhas dedicadas de água, óleo e ar. Estes escoamentos serão direcionados à uma placa

interna de acrílico com a mesma geometria de um trocador de calor PSHE para permitir a caracterização dessa região do trocador. Dessa forma, será possível a visualização do escoamento, a medição de gradientes de pressão ao longo da placa, medição da perda de carga global na placa, e a correlação entre a perda de carga e o número de Nusselt. Não obstante, este trabalho também focará no projeto mecânico necessário para permitir a mistura de óleo, água e ar em larga faixa de condições termodinâmicas. Em virtude da intensa variação de propriedades do escoamento em misturas, é necessária uma abordagem de avaliação baseada no tratamento estatístico das propriedades turbulentas desses escoamentos.

Figura 1 – Placas de tamanhos distintos do trocador PSHE.



Fonte: PAIVA (2017, p.16, apud Kakaç *et al.*, 2012).

A caracterização matemática de escoamentos bifásicos turbulentos é complexa devido a fenômenos como deslizamento de fases, mudanças no padrão de escoamento e transferência de massa entre as fases (SILVA, 2006). Para o cálculo de parâmetros importantes na engenharia térmica e hidrodinâmica, como coeficientes de fricção e de transferência de calor, gradientes de velocidade/pressão etc.; é necessário o uso de análises estatísticas. Essas serão feitas com o auxílio de um tomógrafo de capacitância elétrica (ECT).

A utilização do ECT para medições de velocidade, fração de vazio e vazão é possível em virtude da relação entre propriedades dielétricas dos fluidos/sólidos contidos na parte interna do equipamento, permitindo a caracterização do escoamento. Nesse sentido, o tomógrafo ECT é um instrumento adequado de medição laboratorial para fins de pesquisa.

O tomógrafo possibilita a divisão da seção transversal do duto em 812 sub-áreas de mesma dimensão (pixels), permitindo o tratamento estatístico de forma independente para cada pixel. Dessa forma, é possível obter valores locais de velocidade e concentração em alta frequência, caracterizando escoamentos complexos de interesse.

Por fim, destaca-se que este trabalho tem por objetivos a capacitação de um tomógrafo ECT através de um experimento simplificado e a integração deste a uma complexa bancada experimental multifásica. Esta bancada será futuramente utilizada para caracterização de escoamentos complexos em trocadores de calor como o PSHE.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliação de escoamentos bifásicos líquido-gás a partir do tratamento estatístico de dados obtidos por tomografia.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Projetar e dimensionar uma bancada capaz de gerar misturas de gases e líquidos em condições termodinâmicas controladas (pressões, vazão e temperatura);
- Comissionar a fabricação da mesma, atuando no projeto mecânico da bancada de experimentos multifásicos;
- Integrar o tomógrafo de capacitância elétrica à bancada de experimentos;
- Preparar os dados de saída do tomógrafo para análise de escoamentos bifásicos líquido-gás. Nessa etapa, um código numérico será fornecido para:
 - Disponibilizar em matrizes os campos de velocidade e concentração locais em dois planos distintos do escoamento;
 - Viabilizar o cálculo do gradiente de velocidade próxima à parede do tubo
- Calcular o coeficiente de fricção local e médio;
- Obter, através de correlações, estimativas para o número de Nusselt;
- Determinar o perímetro molhado;
- Criar animação tridimensional do campo de velocidades e de concentração.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será apresentada a base teórica necessária ao desenvolvimento do presente trabalho, dividindo-a em quatro tópicos principais: elementos mecânicos, escoamento turbulento, escoamento bifásico e tomografia de capacitância elétrica.

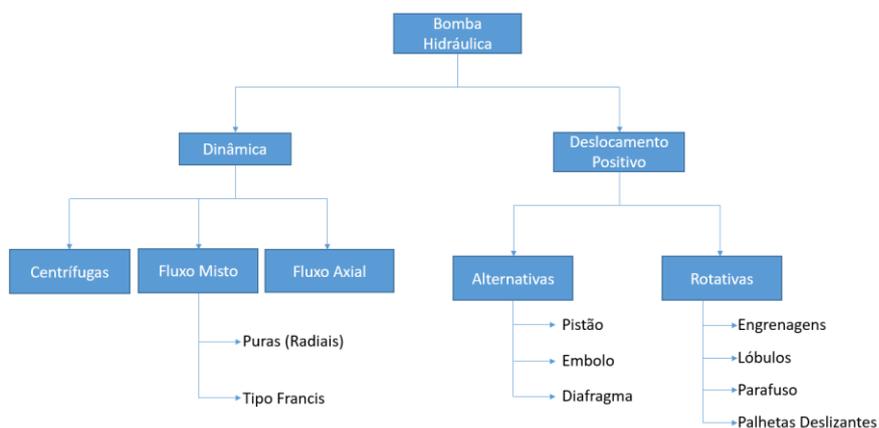
2.1 ELEMENTOS MECÂNICOS

Como ponto de partida para o projeto da bancada de escoamentos multifásicos, serão apresentados os principais elementos que a compõem: bombas hidráulicas, compressor, filtro e válvulas. A seguir serão descritos de forma breve os equipamentos mencionados e as respectivas especificações, incluindo os equipamentos comerciais que satisfazem os critérios de seleção e algumas particularidades sobre estes.

2.1.1 Bomba hidráulica

Conforme Silvestrin (2012), a bomba hidráulica é um dispositivo que fornece energia ao fluido para bombeamento com a conversão da energia mecânica rotacional. A classificação pode ser dada conforme a Figura 2.

Figura 2 – Tipos de bombas hidráulicas.



Fonte: Adaptado pelo autor de Tsutiya (2004, p. 227).

Bombas centrífugas serão destacadas nesse trabalho em razão da grande usabilidade na indústria. Estas possuem alto rendimento, baixo custo de manutenção, operação e instalação, quando comparadas a outras bombas dinâmicas (TSUTIYA, 2004).

A Bomba centrífuga é classificada como um tipo de bomba dinâmica, conforme o esquemático da Figura 2. Bombas dinâmicas transferem energia ao fluido através do giro do rotor, convertendo energia rotacional mecânica em energia cinética (TSUTIYA, 2004). A geometria do rotor, Figura 3, interfere no tipo de bomba centrífuga, na característica do escoamento de saída e na forma como ocorre a transferência de energia ao fluido. Elas também podem ser caracterizadas por diversos outros fatores como: movimento e admissão do líquido, número de rotores, posição do eixo e nível de pressão de trabalho (NETTO, 1998).

Figura 3 – Rotores de turbo-bombas: fechado, semiaberto e aberto, respectivamente.



Fonte: BRASIL (2013, p. 76).

Durante a operação de uma bomba centrífuga ocorre a sucção de fluido a baixa pressão na região de entrada e a descarga a alta pressão na região de saída (recalque).

2.1.2 Compressor

Compressores, assim como as bombas, podem ser classificados em dois grandes grupos: dinâmicos e de deslocamento positivo. Segundo Forsthoffer (2007), o compressor dinâmico centrífugo devido ao seu baixo custo, fácil manutenção e larga faixa de uso, é altamente empregado na indústria em geral.

Figura 4 – Compressor Centrífugo CSV 8,2/25 – 2 HP



Fonte: NOWAK (2017).

Compressores centrífugos, ver exemplo na Figura 4, têm princípio de funcionamento semelhante ao da bomba centrífuga. O gás recebe energia a partir do giro do rotor, e durante sua centrifugação ocorre aumento da pressão estática (BOSCH, 2008).

2.1.3 Filtro

Bortolin (2014) afirma que para o bom funcionamento de um sistema de ar comprimido, é necessário a filtragem do ar a ser utilizado, impedindo que a umidade e particulado interfiram na eficiência do processo. Para a seleção do filtro são necessários os seguintes requisitos: capacidade mínima de separação, redução da concentração de partículas e reduzida queda de pressão em faixas adequadas de vazão de ar (BOSCH, 2008). A exigência com relação à pureza do ar e sua qualidade faz com que haja a escolha do tipo de filtro, entre eles: tipo ciclone, filtro preliminar, filtro de alto desempenho, filtro de carvão ativado; podendo ser combinados entre si (BOSCH, 2008). Para este trabalho, será utilizado um filtro preliminar.

Figura 5 – Filtros de ar com purgador para remoção de óleo.



Fonte: NICSA (2017).

Ao conter impurezas com diâmetro médio até 3 μm , gotículas de óleo e água são extraídas do escoamento de ar em pequenas parcelas através do filtro preliminar (Figura 5). Esse último pode ser utilizado em sistemas que não necessitam de grande qualidade no ar comprimido (BOSCH, 2008) e pode ser empregado no presente projeto de bancada. O princípio de funcionamento é a filtração de superfície com o efeito de peneira. Nesse caso, a dimensão do poro médio do filtro interfere na dimensão da partícula mínima a ser filtrada.

2.1.4 Válvulas

Com objetivos de controlar, estabelecer e interromper o escoamento em um sistema, as válvulas têm grande importância. Seu acionamento pode ser feito manualmente ou automaticamente, dependendo da particularidade da aplicação. Este estudo terá foco em três válvulas: globo, retenção horizontal e redutora de pressão.

2.1.4.1 Globo

Para o controle modular e bloqueio de fluxo com baixo custo, a válvula globo (Figura 6) tem grande funcionalidade. O obstruidor de fluxo, de forma majoritária, está perpendicular ao escoamento (SMITH; ZAPPE, 2004).

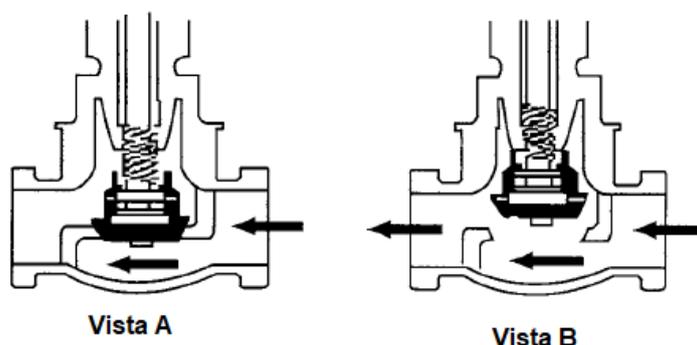
Figura 6 – Válvula globo de tampa roscada BSP ou NPT.



Fonte: MIPEL (2017).

A imagem a seguir ilustra o controle do fluxo. Na Figura 7.a, o obstruidor está totalmente fechado, e na Figura 7.b, encontra-se aberto. De acordo com Anderson (2008), devido a sua característica construtiva, há queda de pressão considerável.

Figura 7 – Configuração da válvula globo fechada (vista a) e aberta (vista b).



Fonte: Adaptador pelo autor de SMITH & MOBLEY (2003, p. 185).

2.1.4.2 Retenção

A válvula de retenção tem como objetivo não permitir o *backflow* (retorno do escoamento) no sistema e, deste modo, não promover contaminação nas linhas ou danificação de equipamentos. Seu fechamento ocorre devido à variação de pressão quando há modificação na direção principal do escoamento. Seu acionamento é automático e há elevada perda de carga quando atuada (PARISHER; RHEA, 2002). Existem três tipos: levantamento, portinhola e esfera. A válvula do tipo portinhola (

Figura 8), é a mais utilizada e promove menor perda de carga que a de levantamento (SILVA, 2011). Neste projeto se utilizará válvulas de retenção que atendem a norma (NBR 15055). As restrições de uso estão relacionadas aos níveis de pressão e temperatura de trabalho.

Figura 8 – Válvula de retenção horizontal com portinhola.



Fonte: Docol (2017)

2.1.4.3 Redutora de pressão

Diferentemente das válvulas anteriores, a válvula redutora de pressão (Figura 9) tem como objetivo diminuir a pressão após ultrapassar um valor pré-determinado. Ela é importante para a não danificação de equipamentos ou segurança dos trabalhadores (SMITH; ZAPPE, 2004).

Figura 9 – Válvula redutora de pressão P25.

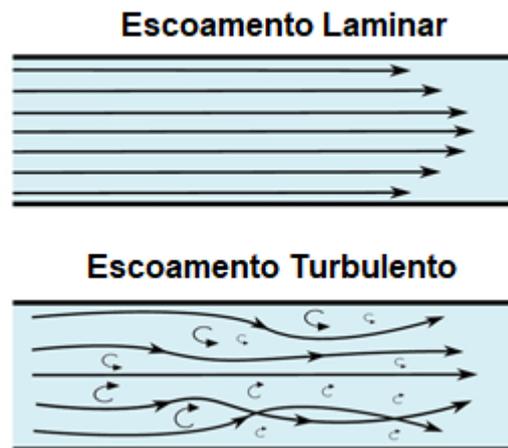


Fonte: EMMETI (2017).

2.2 ESCOAMENTO TURBULENTO

A abordagem do regime turbulento de um escoamento será dada através de ferramentas estatísticas. Tal abordagem clássica tem como pioneiros: Osborne Reynolds, G. I. Taylor, Prandtl, von Kármán, e Kolmogorov. Grande parte das pesquisas acadêmicas enfatizam um ponto de vista determinístico (POPE, 2000).

Figura 10 – Linhas de correntes de escoamento laminar e turbulento.



Fonte: Adaptado pelo autor de CFDSUPPORT (2017).

Uma característica importante do escoamento turbulento (Figura 10) é sua capacidade de transportar e misturar fluidos, de forma mais eficiente do que em um escoamento laminar, como demonstrado pelo experimento de Reynolds (1883). A turbulência é caracterizada por um parâmetro adimensional, hoje conhecido como número de Reynolds (Equação 1):

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (1)$$

onde U é uma velocidade característica, D , o diâmetro do tubo e ν , a viscosidade cinemática do fluido.

Em um escoamento em um tubo, U é, normalmente, representada pela velocidade axial média. Se o número de Reynolds for menor que 2300, ele é considerado em regime laminar, ou seja, a velocidade do fluido não muda com o

tempo e todas as linhas de correntes são paralelas ao eixo axial do tubo. No entanto, se Reynolds exceder 4000, o escoamento é dito como turbulento.

Diferentes técnicas de análise têm sido usadas para o estudo da turbulência. A turbulência em fluidos pode ser analisada de forma espectral, apresentando diferentes escalas que compõem o escoamento. Grandes escalas espaciais são fortemente influenciadas pela geometria do escoamento (condições de contorno), influenciando no controle do transporte de propriedades e de mistura. O comportamento das pequenas escalas espaciais é determinado de forma significativa pela taxa de energia recebida das grandes escalas e pela viscosidade do fluido (POPE, 2000).

Tanto o escoamento laminar como o turbulento são caracterizados segundo as equações de conservação (continuidade, quantidade de movimento e energia). Escoamentos turbulentos são complexos e a solução exata das equações de conservação é impossível, gerando o famoso problema do fechamento (*closure problem*).

Uma forma de obtenção de solução exata, frequentemente referenciada, é através do método numérico *Direct Numerical Simulation* (DNS), limitada a geometrias simplificadas. Para alto valores de Reynolds, o escoamento acaba sendo intratável por esse método, pois necessita de uma discretização espacial e temporal extremamente refinada; demandando imensa capacidade computacional. Deste modo, há fundamentalmente duas alternativas numéricas: o uso de *Large Eddy Simulation* (LES), que ainda continua sendo impraticável computacionalmente, mesmo sendo mais econômico que DNS por resolver parcialmente as escalas do escoamento turbulento; e o uso de *Reynolds Average Navier-Stokes Equations* (RANS). O método RANS é mais simplificado e impreciso, utilizando parâmetros médios, para descrever comportamentos estocásticos (DISCONZI, 2011).

A caracterização da velocidade em um tempo e posição especificados, em escoamentos laminares, pode ser feita de forma simples através da utilização da equação de Cauchy. Entretanto, quando se trata de regimes turbulentos, a velocidade acaba sendo uma variável randômica. De forma probabilística, podemos caracterizar a velocidade instantânea como sendo a soma da velocidade média e de uma parcela de flutuação referente à turbulência:

$$U(x, t) = \bar{U}(x, t) + u(x, t) \quad (2)$$

A representação da velocidade acima, Eq. (2), também pode ser estendida a outras propriedades instantâneas do escoamento. A flutuação da velocidade será caracterizada pelo desvio padrão dos dados obtidos através da tomografia. Dessa forma, modificações das propriedades do escoamento podem ser posteriormente analisadas.

2.2.1 Equações de movimento do fluido

O comportamento do escoamento pode ser obtido através das equações da continuidade, da quantidade de movimento e da energia. Por simplicidade, serão apenas considerados escoamentos incompressíveis de fluidos Newtonianos, satisfazendo as hipóteses para a aplicação da equação de Navier-Stokes.

A conservação da massa é dada através de:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho U) = 0 \quad (3)$$

onde ρ é a massa específica e $\frac{\partial}{\partial t}$ a derivada temporal.

A equação do movimento da partícula é baseada na segunda lei de Newton e relaciona a aceleração da partícula com as forças de superfície e campo. As forças de superfície são descritas pelo tensor tensão e as forças de campo são, em geral, dadas pela gravidade (POPE, 2000).

Essas forças causam a aceleração do fluido de acordo com a equação em notação indicial:

$$\rho \frac{DU_j}{Dt} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} - \rho \frac{\partial \Psi}{\partial x_j} \quad (4)$$

onde, $\Psi = gz$, DU/Dt é a derivada material da velocidade U , τ_{ij} é o tensor tensão de Cauchy.

No caso de fluidos newtonianos, o tensor tensão é dado por:

$$\tau_{ij} = -P\delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

onde P é a pressão estática e μ , o coeficiente da viscosidade dinâmica. Substituindo a equação anterior na equação da aceleração do fluido, e sabendo que ρ e μ são uniformes e que o divergente da velocidade é nulo, obtém-se a Equação de Navier-Stokes:

$$\rho \frac{DU_j}{Dt} = \mu \frac{\partial^2 U_j}{\partial x_i \partial x_i} - \frac{\partial P}{\partial x_j} - \rho \frac{\partial \Psi}{\partial x_j} \quad (6)$$

Definindo a pressão modificada,

$$p = P + \rho\Psi \quad (7)$$

Pode obtém-se uma simplificação para a equação de Navier-Stokes:

$$\frac{DU}{Dt} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \nu \nabla^2 U \quad (8)$$

Em uma parede estacionária e não porosa com vetor normal n , a condições de contorno é a condição de impermeabilidade; $n \cdot U = 0$ (POPE, 2000).

Assumindo a hipótese de escoamento invíscido, obtém-se equação de Euler:

$$\frac{DU}{Dt} = -\frac{\nabla p}{\rho} \quad (9)$$

O gradiente de velocidade pode ser decomposto em uma parte isotrópica, uma simétrica e outra antissimétrica, (POPE, 2000):

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{\Delta \delta_{ij}}{3} + S_{ij} + \Omega_{ij} \quad (10)$$

O primeiro termo é nulo para escoamento incompressível. O segundo e terceiro termos são dados por:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right), \Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (11)$$

onde o segundo termo é a tensor taxa de deformação, enquanto o terceiro é o tensor e taxa de rotação.

Desta forma, com a equação da continuidade e a equação de Navier-Stokes, podemos descrever matematicamente os escoamentos incompressíveis. No próximo tópico, serão discutidos relevantes parâmetros da turbulência e o número de Nusselt.

2.2.2 Parâmetros de turbulência e número de Nusselt

Para melhor compreensão dos escoamentos turbulentos, alguns conceitos clássicos são introduzidos nessa seção, como a energia cinética turbulenta e as escalas de Kolmogorov.

Richardson (1922, apud POPE, 2000, p. 182) introduziu o conceito de cascata de energia, onde parte da energia cinética do escoamento é retirada das grandes escalas espaciais (geralmente influenciadas pelas condições de contorno do escoamento) e transferida para as escalas da subfaixa inercial. Essa energia é transferida de forma invíscida dos grandes turbilhões até as menores escalas do escoamento, onde enfim ocorre a dissipação de energia cinética (ε).

A quantificação desse processo e a caracterização das relações entre pequenas e grandes escalas foram realizadas posteriormente por Kolmogorov (1941). Kolmogorov propôs que as escalas dissipativas podem ser determinadas baseadas na taxa de dissipação de energia cinética e da viscosidade cinemática. As escalas de Kolmogorov de comprimento (η), velocidade (u_η) e tempo (τ_η) podem ser escritas, respectivamente, como:

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4} \quad (12)$$

$$u_\eta = (\varepsilon \nu)^{1/4} \quad (13)$$

$$\tau_\eta = \left(\frac{\nu}{\varepsilon}\right)^{1/2} \quad (14)$$

A energia cinética turbulenta (k) é definida como metade do traço (diagonal principal) do tensor tensão de Reynolds; ver equação 15. Caso k seja nula, as equações das velocidades instantâneas seriam idênticas as da velocidade média.

$$k = \frac{1}{2} \langle u_i u_i \rangle \quad (15)$$

A taxa de dissipação da energia cinética turbulenta instantânea, que ocorre nos turbilhões de pequenas escalas, é dada pela equação:

$$\varepsilon = 2\nu \langle S_{ij} S_{ij} \rangle \quad (16)$$

A taxa de produção de energia cinética turbulenta é dada pela Equação 17. Esse termo representa um sumidouro de energia na equação da energia cinética do escoamento e um termo fonte na equação de dissipação de energia cinética. Em escoamentos internos como em dutos, o termo de produção e o termo de dissipação de energia cinética possuem mesma magnitude em alguns pontos da seção transversal.

$$P = 2\nu_t \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij} \quad (17)$$

O termo de produção é relevante próximo a paredes. A produção local pode ser aproximada por:

$$P = \nu_t \left(\frac{\partial \langle U \rangle}{\partial y} \right)^2 \quad (18)$$

onde ν_t é a viscosidade turbulenta, que é, em geral, dependente do número de Reynolds do escoamento, variando de acordo com o modelo de turbulência adotado. Esse será elucidado na seção 2.2.3.

Até o momento foi discutido o transporte turbulento de *momentum* (quantidade de movimento). Contudo, há uma relação direta entre o aumento de transporte de

momentum e o aumento do transporte de energia ou de espécies (massa). O transporte convectivo de energia é representado pelo número de Nusselt. O número de Nusselt é a razão entre a transferência de calor por convecção e a transferência de calor por condução em uma dada camada de fluido. A transferência de calor e de quantidade de movimento podem ser relacionadas, por exemplo, através da analogia Chilton-Colburn (Equação 19). Com o intuito de estimar Nusselt, através da equação 19, em escoamento turbulento em tubos, faz-se necessário estimar: Reynolds, Prandtl e coeficiente de fricção. Sendo que essa analogia é válida para Prandtl de 0,6 até 60 (ÇENGEL, 2002).

$$Nu = \frac{C_f Re}{2Pr^{-1/3}} \quad (19)$$

O coeficiente de fricção é obtido através de:

$$C_f = \frac{\tau_w}{\rho U^2 / 2} \quad (20)$$

onde a tensão cisalhante na parede (τ_w) é obtida através do produto entre a viscosidade dinâmica e o gradiente de velocidade na parede:

$$\tau_w = \mu \frac{dU}{dy} \quad (21)$$

O parâmetro adimensional Prandtl representa a razão entre a viscosidade cinemática e a difusividade térmica (INCROPERA, 2006):

$$Pr = \frac{\nu}{\gamma} \quad (22)$$

2.2.3 Modelo de turbulência

Os modelos de turbulência ou modelos de viscosidade turbulenta são fundamentados na associação entre as tensões de Reynolds e a taxa de deformação do escoamento médio, como proposto por Boussinesq (1877, apud EGER, 2010, p. 22). Há quatro grandes grupos de modelos: algébricos, uma equação, duas equações,

tensões de Reynolds (EGER, 2010). Por simplicidade, destacaremos os modelos de duas equações, que utilizam duas equações de transporte para obter escalas turbulentas de velocidade e comprimento (POPE, 2000), e, em particular, o modelo $k - \varepsilon$. Esse último é o mais utilizado comercialmente por fornecer estimativas razoáveis com custo computacional relativamente baixo.

$$v_t = C_t \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (23)$$

No modelo $k - \varepsilon$, a viscosidade turbulenta, Eq. (23), pode ser determinada a partir de estimativas para os parâmetros k e ε , e de uma constante, C_t . Valor usual de C_t é 0,09, assumindo que a relação $\mathcal{P} / \varepsilon$ seja unitária (POPE, 2000, p. 374).

2.3 ESCOAMENTO BIFÁSICO

Sendo comumente encontrado na indústria, o escoamento bifásico consiste da presença de duas fases, separadas por uma ou mais interfaces. Nota-se a dificuldade em prover a formulação matemática para compreensão física desse tipo de escoamento. Nessa seção, serão explorados os conceitos básicos, padrões de escoamentos horizontais e mapas de padrões em escoamentos líquido-gás.

2.3.1 Conceitos básicos

Serão adotadas como hipóteses: escoamento em regime permanente, adiabático, unidirecional e existência de propriedades médias das fases na direção axial do duto.

A vazão mássica total, m , é igual a parcela da vazão mássica do gás, m_g , e do líquido, m_l , (PEREIRA, 2006):

$$m = m_g + m_l \quad (24)$$

Da mesma forma conceitual na termodinâmica, o título, x_t , é definido como a razão entre a massa de gás e a massa total:

$$x_t = \frac{m_g}{m_g + m_l} \quad (25)$$

As vazões mássicas do líquido e do gás podem ser reescritas como o produto das vazões volumétricas em função da área preenchida pela fase e de sua massa específica como:

$$m_g = \rho_g U_g A_g \quad (26)$$

$$m_l = \rho_l U_l A_l \quad (27)$$

onde U_g e U_l são as velocidades médias de cada fase.

Um conceito usual é a velocidade superficial, definida como a possível velocidade que a fase teria caso o escoamento fosse monofásico. Sendo assim, as velocidades superficiais do gás e do líquido são:

$$j_g = \frac{Q_g}{A} \quad (28)$$

$$j_l = \frac{Q_l}{A} \quad (29)$$

onde, Q_g é a vazão volumétrica do gás e Q_l a vazão volumétrica do líquido.

A fração de vazio, α , é a razão entre o volume ocupado pelo gás e o volume total (PEREIRA, 2006). Esse parâmetro tem grande importância em escoamentos bifásicos, estando relacionado à queda de pressão e à transferência de calor (ROCHA; SIMÕES-MOREIRA, 2007).

$$\alpha = \frac{V_g}{V_g + V_l} \quad (30)$$

A vazão mássica por unidade de área, ou seja, fluxo mássico específico, é dada pela equação:

$$G = G_l + G_g = \frac{m_l}{A} + \frac{m_g}{A} \quad (31)$$

A velocidade média do meio líquido e gasoso não necessitam ser as mesmas. Portanto, temos, através da conservação da massa, o conceito de escorregamento (COLLIER; THOME, 1996):

$$S = \frac{U_g}{U_l} = \frac{\rho_l x_t (1 - \alpha)}{\rho_g \alpha (1 - x_t)} \quad (32)$$

O gradiente de pressão ao longo do escoamento pode ser dividido em três componentes (COLLIER; THOME, 1996):

$$-\frac{dP}{dz} = -\left(\frac{dP}{dz}\right)_{\text{atrito}} - \left(\frac{dP}{dz}\right)_{\text{gravitacional}} - \left(\frac{dP}{dz}\right)_{\text{aceleração}} \quad (33)$$

onde a primeira parcela é referente à queda de pressão devido ao atrito entre as fases e também com a parede; a segunda parcela, à coluna bifásica, e a terceira, à aceleração do escoamento:

$$-\left(\frac{dP}{dz}\right)_{\text{gravitacional}} = g \sin \theta [\alpha \rho_g + (1 - \alpha) \rho_l] \quad (34)$$

$$-\left(\frac{dP}{dz}\right)_{\text{aceleração}} = G^2 \frac{d}{dz} \left[\frac{x_t^2}{\alpha \rho_g} + \frac{(1 - x_t)^2}{(1 - \alpha) \rho_l} \right] \quad (35)$$

onde, θ é o ângulo de inclinação do duto, z , a direção principal do escoamento e g , a aceleração da gravidade.

O termo devido ao atrito pode ser calculado com o gradiente de pressão monofásico, utilizando fatores de correção, Φ , que serão explanados posteriormente. De mesma maneira, podem ser propostos três possíveis modos para esta parcela (COLLIER; THOME, 1996):

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{\text{atrito}} = \Phi_{lo}^2 \left(\frac{dP}{dz}\right)_{lo} = \Phi_l^2 \left(\frac{dP}{dz}\right)_l = \Phi_g^2 \left(\frac{dP}{dz}\right)_g \quad (36)$$

onde o subscrito l_0 é um fator de correção obtido quando a vazão total é considerada como somente líquido, l , quando apenas a fase líquida é considerada e g , quando somente gás é considerado.

2.3.2 Modelo de fases

Os principais modelos de análise de escoamentos bifásicos são: homogêneo, escoamento separado e dois fluidos. Neste trabalho, trataremos com o modelo de escoamento separado por sua aplicação generalizada. O modelo homogêneo é, em geral, empregado para o caso de regime borbulhado em altas pressões e vazões (PEREIRA, 2006). Já o modelo de dois fluidos necessita de informações precisas com relação à transferência de calor e ao atrito entre as fases e a parede. Em razão da dificuldade em obter essas informações, esse modelo não é abordado.

Na abordagem de escoamento separado, supõe-se que as fases têm propriedades e velocidades distintas. São hipóteses desse modelo: o equilíbrio termodinâmico entre as fases, o multiplicador de atrito bifásico (Φ^2) e a fração de vazão como variáveis independentes. Lockhart e Martinelli (1949) apresentaram uma generalização para o modelo, determinando multiplicadores como Φ_l e Φ_g .

O parâmetro de Lockhart-Martinelli, X^2 , Equação 37, é definido como a razão entre as quedas de pressão na fase líquida e gasosa. Quando $X^2 \geq 1$, será a fase líquida que causa maior perda de carga; caso contrário, será a gasosa que tem a maior relevância na perda de carga (OLIVEIRA, 2007).

$$X^2 = \frac{(dp/dz)_l}{(dp/dz)_g} \quad (37)$$

Em regimes turbulentos, o parâmetro Lockhart-Martinelli pode ser expresso como:

$$X^2 = \frac{\rho_g}{\rho_l} \left(\frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^{0,25} \left(\frac{1 - x_t}{x_t} \right)^{1,75} \quad (38)$$

O parâmetro de Lockhart-Martinelli é usado para determinar os multiplicadores bifásicos, utilizados para o cálculo do gradiente de pressão devido ao atrito:

$$\Phi_l^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (39)$$

$$\Phi_l^2 = 1 + CX + X^2 \quad (40)$$

onde o coeficiente C é dependente do regime de escoamento para cada fase, conforme Tabela 1 (COLLIER; THOME, 1996).

Tabela 1 – Valores do coeficiente C para as equações 39 e 40.

Líquido	Vapor	C
Turbulento	Turbulento	20
Laminar	Turbulento	12
Turbulento	Laminar	10
Laminar	Laminar	5

Fonte: Adaptado pelo autor de PEREIRA (2006, p. 16).

2.3.3 Padrões de escoamento

Diferentemente de escoamentos monofásicos, que podem ser caracterizados com base em seu número de Reynolds (classificação com relação à laminar, em transição ou turbulento) e da ocorrência do descolamento da camada limite, em escoamentos bifásicos também são necessários a caracterização da superfície livre do escoamento, o movimento relativo entre fases e a topologia.

Os padrões de escoamento dependem da orientação e da geometria do tubo, das condições de operação e das propriedades dos fluidos. Serão destacados os padrões de escoamentos horizontais (Figura 11), onde a gravidade promove assimetria entre as fases. Nesse caso, a fase gasosa está presente majoritariamente na parte superior do escoamento em razão de reduzida massa específica.

Figura 11 – Padrões de escoamento horizontais.



Fonte: Brennen (2005, p.167).

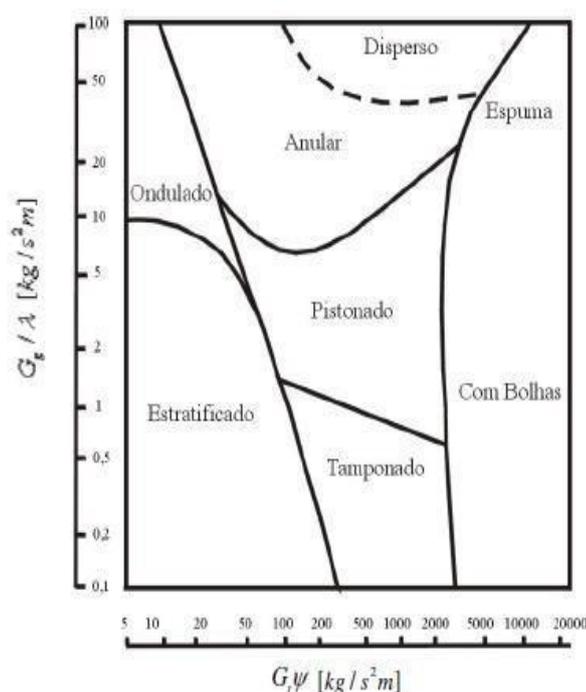
Os padrões de escoamentos horizontais podem ser classificados como:

- Borbulhado (Bubbly Flow): bolhas de gás dispersas no meio líquido;
- Tamponado (Plug Flow): bolsões de ar presentes na parte superior do escoamento;
- Estratificado (Stratified Flow): fases bem separadas e interfaces aproximadamente lisas; ocorrem em velocidades de escoamentos reduzidas;
- Ondulado (Wavy Flow): com o aumento da velocidade da fase gasosa, a interface se torna irregular;
- Pistonado (Slug Flow): a superfície de contato entre fases é rompida em determinados pontos, e pequenas gotas passam para a fase gasosa, podendo atingir a parte superior do tubo. Nesse caso, a velocidade média da fase gasosa é maior que no padrão ondulado;
- Anular (Annular Flow): espessura do filme de líquido no perímetro do tubo é maior na parte inferior, sendo o centro do tubo dominado pela porção gasosa do escoamento;
- Disperso (Disperse): Escoamento majoritariamente dominado pela fase gasosa com gotículas dispersas em seu meio.

2.3.4 Mapas de padrões

Uma forma quantitativa de determinar os padrões de escoamento é segundo os mapas de padrões. A partir da variação dos fluxos mássicos das fases gasosa e líquida (G_g e G_l) ou da variação de outros parâmetros associados ao escoamento, é possível caracterizar seu padrão (BRENNEN, 2005). Devido à complexidade de construir um mapa de padrões geral, descrevendo todas as variáveis presentes no processo de transição, eles são realizados sob condições termodinâmicas específicas. O mapa de padrão horizontal de Baker (1954) apud Brennen é visto na Figura 12.

Figura 12 – Mapa de padrões de escoamento horizontais de Baker (1954)



Fonte: Baker apud Brennen (2005, p.171).

O mapa de padrões apresentado acima foi determinado com diâmetro máximo de tubo igual a 5 cm e na orientação horizontal. Os eixos representam os fluxos mássicos das fases líquida e gasosa, corrigidos pelos multiplicadores λ e ψ ; ver Equações 41 e 42.

$$\lambda = \left[\left(\frac{\rho_g}{\rho_A} \right) \left(\frac{\rho_l}{\rho_w} \right) \right]^{1/2} \quad (41)$$

$$\psi = \left(\frac{\sigma_w}{\sigma_l} \right) \left[\left(\frac{\mu_l}{\mu_w} \right) \left(\frac{\rho_w}{\rho_l} \right)^2 \right]^{1/3} \quad (42)$$

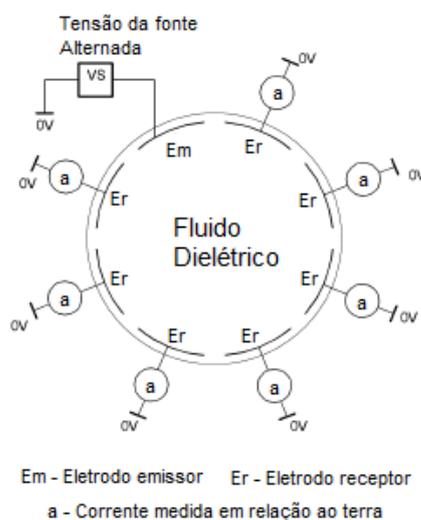
2.4 TOMOGRAFIA DE CAPACITÂNCIA ELÉTRICA

Como visto anteriormente, é de extrema importância o conhecimento da fração de vazio para a determinação da transferência de calor, perda de carga e queda de pressão. Há diversas técnicas de medição de escoamentos bifásicos como: PIV, efeitos Doppler, ultrassom, impedância elétrica, sondas intrusivas, válvulas de fechamento rápido (VFR), atenuação radioativa, tomografia; ver Oliveira (2007). O corrente trabalho terá enfoque na tecnologia de tomografia.

A tomografia por capacitância elétrica é uma técnica de medição onde o escoamento de dois materiais dielétricos é reconstruído através da distribuição de capacitância elétrica ou da permissividade dos fluidos dentro de um duto. Após estabelecida a permissividade, a concentração é definida. Se a medição for feita em dois planos, há a possibilidade de mensurar a velocidade e a vazão volumétrica global (PROCESS TOMOGRAPHY, 2009). Os parâmetros obtidos são referentes ao material mais permissivo; no caso o óleo, em escoamentos ar-óleo.

A medição da capacitância é retratada na figura abaixo. Tensão alternada (V_s) é aplicada entre o eletrodo emissor e o terra. Em seguida, o fluxo de corrente resultante (α) entre o eletrodo emissor e o receptor é medido. A corrente medida é diretamente proporcional a capacitância entre os eletrodos.

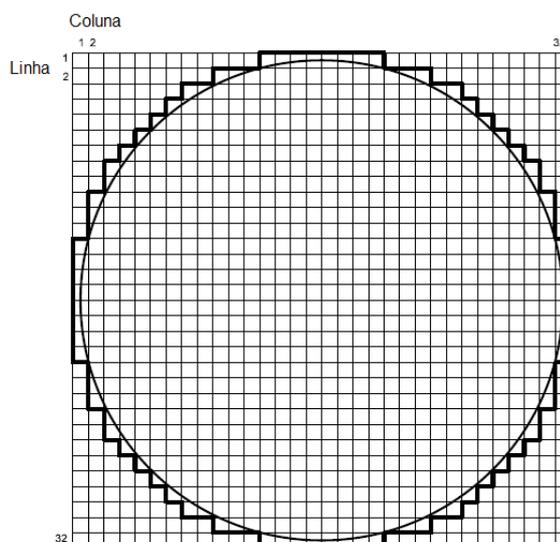
Figura 13 – Disposição dos eletrodos para a medição da capacitância.



Fonte: Adaptado pelo autor de PROCESS TOMOGRAPHY (2009, p.13).

Para o cálculo do campo de velocidades e de vazão é primordial a formação de zonas de análises, que são compostas por pixels. Usualmente o formato de imagem do ECT da empresa *Tomoflow Process Tomography* é de 32 x 32 pixels (Figura 14), sendo 812 permitidos como forma de aproximação da área seccional do tubo. Cada pixel tem resolução espacial de 1,25 mm² (PROCESS TOMOGRAPHY, 2009). Uma zona pode ser composta por diversos pixels ou apenas um único pixel.

Figura 14 – Arranjo dos pixels na área seccional do tomógrafo.



Fonte: PROCESS TOMOGRAPHY (2009, p.31).

Também se faz necessário o uso do conceito de correlação cruzada. Trata-se de uma técnica para estabelecer o tempo de trânsito do fluido, através do pico de correlação, que é calculado ao se comparar as concentrações em dois planos de medição, Equação 43, onde τ é o tempo de trânsito da estrutura fluida da zona i ou pixel i nos planos em análise (TOMOFLOW LTD, 2003).

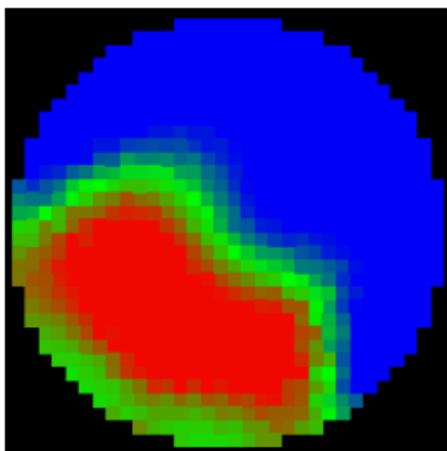
$$R_{xy,i}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T C_{1,i}(t)C_{2,i}(t + \tau)dt \quad (43)$$

O tempo de trânsito pode ser descrito com a equação 44. D_e é o diâmetro de uma estrutura esférica hipotética, l , o comprimento dos sensores, L_s , a distância entre sensores e V , a velocidade com que a estrutura passa pelos sensores.

$$\tau = \frac{V}{L_s + 2l + D_e} \quad (44)$$

As imagens geradas são relativamente de baixa resolução espacial (Figura 15), entretanto, podem ser geradas em elevadas velocidades e com alta resolução temporal. As imagens podem ser concebidas em altas taxas de quadros por segundo, até 5000 fps (quadros por segundo), para ECTs com 8 eletrodos (PROCESS TOMOGRAPHY, 2009).

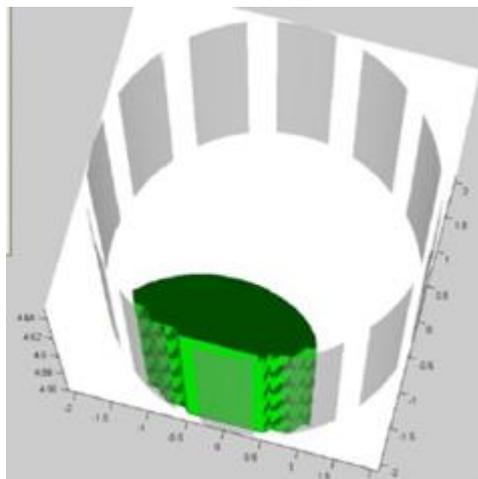
Figura 15 – Representação da resolução espacial do ECT.



Fonte: Adaptado pelo autor de PROCESS TOMOGRAPHY (2009, p.25).

Com o cálculo do campo de velocidades, é possível realizar a reconstrução 3D do escoamento (Figura 16) e, dessa forma, identificar o padrão de escoamento.

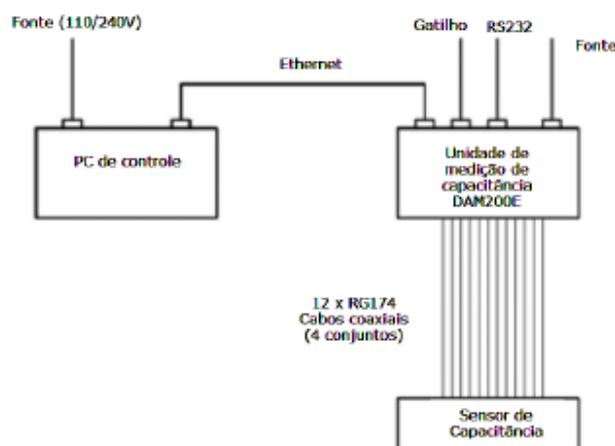
Figura 16 – Reconstrução tridimensional realizada no software *Flowan*.



Fonte: O autor (2017).

O tomógrafo ECT é composto basicamente por três sistemas: sensores de capacitância, unidade de medição de capacitância (CMU) e computador de controle, ver Figura 17. Esta técnica tem um custo elevado. Todavia, o ECT é aplicado com sucesso na presença de escoamentos bifásicos onde há diferença clara de permissividade entre as fases, além de ser uma técnica não intrusiva (PROCESS TOMOGRAPHY, 2009).

Figura 17 – Configuração dos equipamentos do ECT.



Fonte: Adaptado pelo autor de PROCESS TOMOGRAPHY (2009, p.12).

3 PROJETO DA BANCADA MULTIFÁSICA

Este capítulo descreve o projeto mecânico de uma bancada com o objetivo de gerar misturas de gases e líquidos em condições termodinâmicas controladas (pressão, vazão e temperatura). Posteriormente, será feito o detalhamento das características dos principais componentes instalados, assim como as faixas termodinâmicas requeridas.

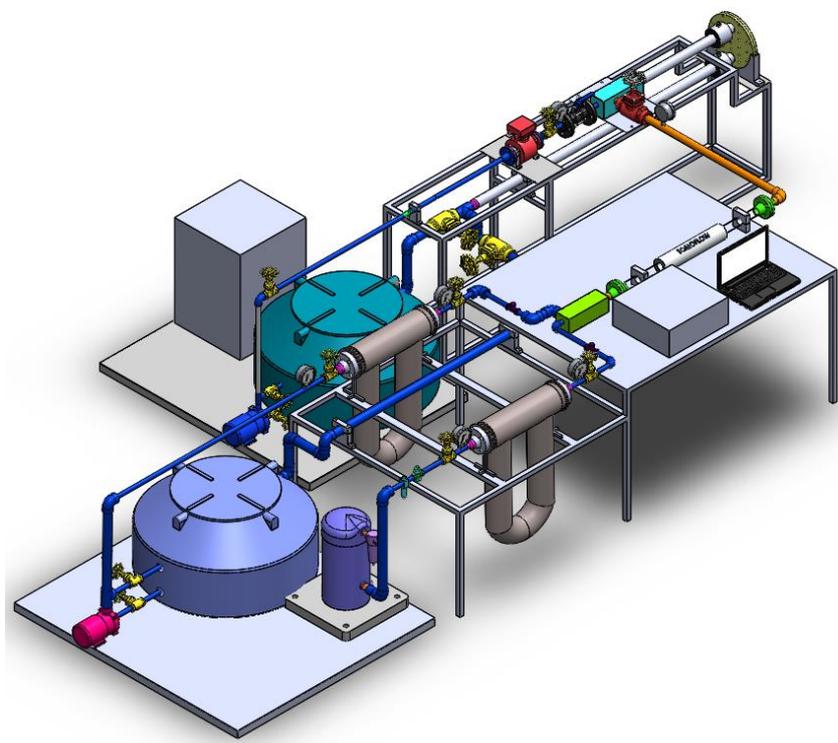
3.1 PROJETO MECÂNICO

Como relatado anteriormente, o objetivo geral da bancada é proporcionar uma vasta gama de escoamentos com pelo menos 1, 2 ou 3 fases (ar, água e/ou óleo). Esses escoamentos serão criados para caracterizar a região interna da placa de um trocador de calor PSHE, além de permitir a visualização do escoamento, a medição dos gradientes de pressão ao longo do canal e da perda de carga, e a correlação entre a perda de carga e o número de Nusselt.

A Figura 18 demonstra a bancada completa, com as 3 linhas existentes e suas regiões de mistura. No tanque da cor azul encontra-se água, e no roxo óleo. No bloco verde ocorre a mistura do óleo com o ar, e no bloco azul a mistura das três fases (ar, óleo e água). Os dois misturadores têm o mesmo princípio de construtivo.

Entretanto, para o presente trabalho, o propósito é a caracterização de misturas gás-líquido que alimentarão o trocador PSHE. Na figura abaixo é ilustrado o projeto completo da bancada. Contudo, a descrição a seguir contemplará apenas os componentes anteriores ao tomógrafo.

Figura 18 – Esquemático da bancada de testes multifásica, adaptada para alimentar um canal de um trocador de calor PSHE.



Fonte: O autor (2017).

Observa-se que a existência de duas linhas anteriores à mistura (que ocorre no bloco verde – caixa de mistura) e ao Tomoflow ECT, uma referente ao gás e a outra, ao óleo. Nas linhas que contêm apenas uma fase, a tubulação será de aço INOX com diâmetro externo de 1 polegada. Na região com duas ou mais fases, o diâmetro da tubulação terá a dimensão de 40 mm. A escolha do aço inoxidável como material da tubulação é em razão da sua durabilidade, resistência à corrosão, da segurança e do baixo custo de manutenção.

Como forma de controle de temperatura, haverá um banho termostático acoplado a linha de óleo ou de ar, dependendo dos testes a serem realizados, tal controle será melhor elucidado na seção 3.3.

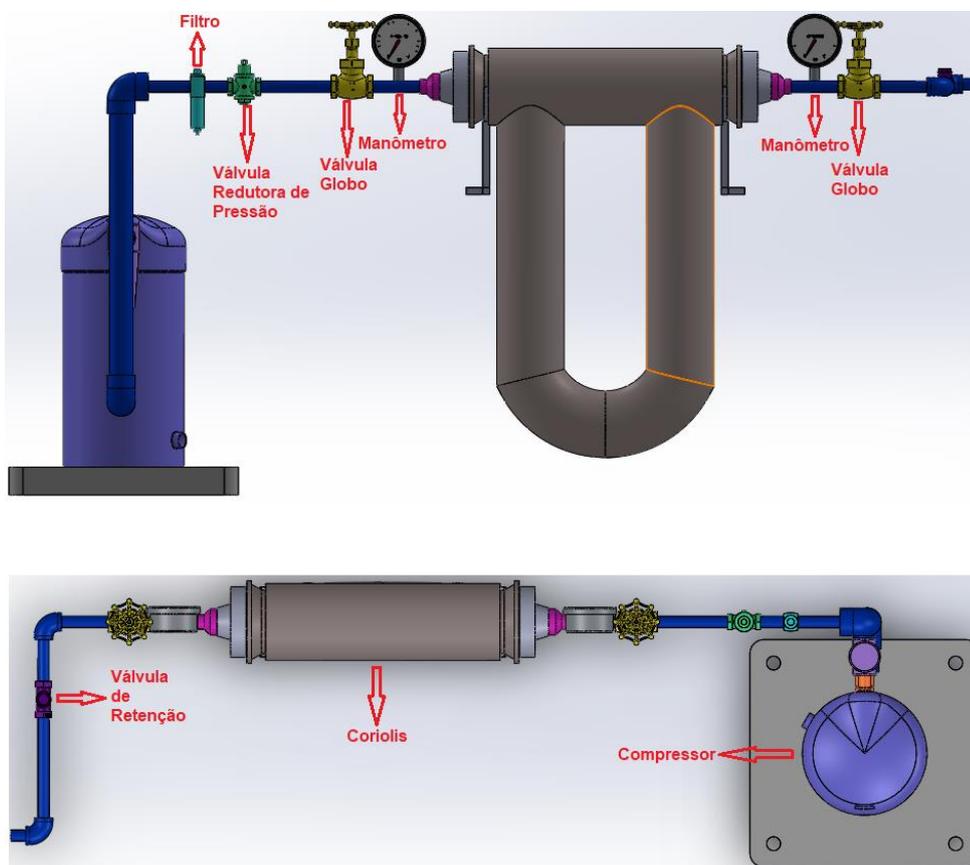
Um Coriolis está presente na linha monofásica de gás e um segundo na linha monofásica de óleo. Devido ao seu modo de funcionamento (breve explicação na seção 3.2.3), é necessária a ausência de contato com o solo para que o mesmo tenha livre movimento, ocasionando uma medição correta. Deste modo, foi concebido um suporte para cada Coriolis, o qual é acoplado à bancada. Há também a presença de reduções e expansões para permitir o acoplamento do Coriolis às tubulações de 1

polegada. Essa necessidade é promovida pelo diâmetro de entrada do Coriolis ser de 2 polegadas. Em seguida, será feita a descrição de cada linha monofásica de ar e óleo, da linha da mistura ar-óleo.

3.1.1 Linha de gás

Na Figura 19 é apresentada detalhadamente a linha monofásica de gás presente na bancada. Inicialmente, há a presença de um compressor. Em seguida, faz-se necessária a presença de um filtro à frente dele para que não haja contaminação da linha e de uma válvula redutora de pressão para evitar o comprometimento dos equipamentos posteriores, além de promover segurança. Anterior ao Coriolis, há a presença de um manômetro e uma válvula globo, para medição de pressão e controle de fluxo, respectivamente. Para que haja um melhor controle na saída do Coriolis, instalou-se mais um conjunto de manômetro e válvula globo.

Figura 19 – Visão Frontal e superior do esquemático da linha de gás.



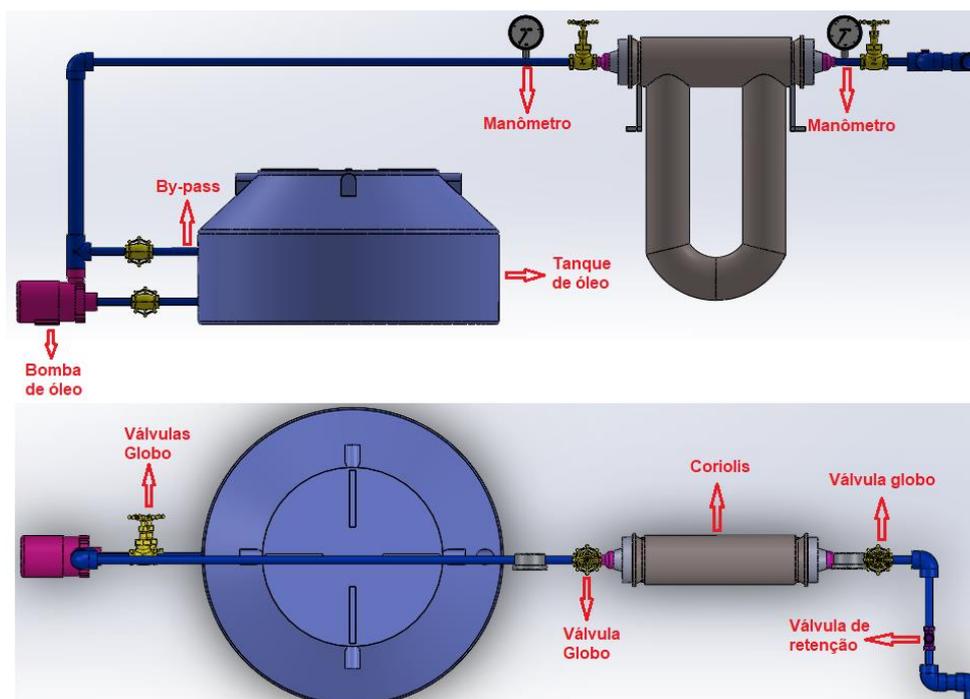
Fonte: O autor (2017).

Quando a linha de ar comprimido for acionada e a de óleo já estiver ativa, ocorrerá uma queda de pressão no momento da mistura que pode ocasionar *backflow*. Objetivando a não ocorrência desse evento indesejável, que promove contaminação da linha e possível danificação de dispositivos, utiliza-se uma válvula de retenção horizontal.

3.1.2 Linha de óleo

A linha de óleo (Figura 20) é análoga à linha de gás. Entretanto, a movimentação do fluido é promovida por uma bomba centrífuga. Esta se encontra em um suporte diferente do restante da linha para que não ocorra vibração na placa de acrílico, o que poderia acarretar em possíveis erros nas medições ou danos aos sensores e acoplamentos. A bomba centrífuga utilizará o fluido proveniente de um tanque de 310 litros. Há existência de um *by-pass* entre a bomba e o tanque para controle de pressão e de vazão quando a mesma é acionada. Como o Coriolis dessa linha possui diâmetro interno de 2 polegadas, sua conexão com a tubulação ocorre através de flanges. Para a conexão dos flanges com a tubulação de uma polegada, serão incorporados um redutor e um expansor linear.

Figura 20 – Visão frontal e superior do esquemático da linha de óleo.

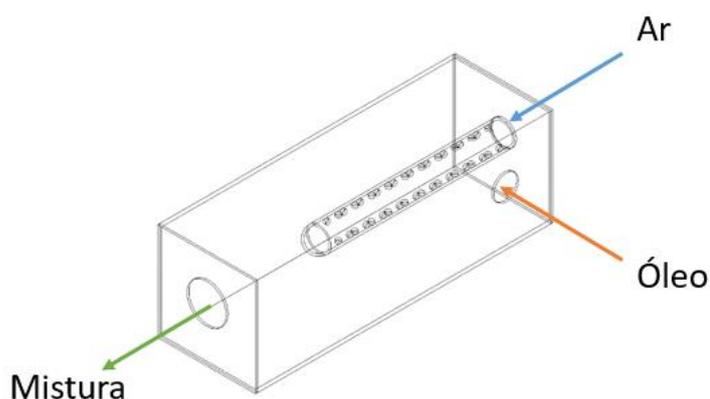


Fonte: O autor (2017).

3.1.3 Linha bifásica

A linha de mistura contém basicamente dois itens principais: um misturador e o tomógrafo ECT. O misturador (Figura 21) é composto de duas entradas (para o óleo e para o ar) e uma saída (mistura). A entrada de ar é composta de um tubo cilíndrico de 1 polegada com furos para a inserção de ar. Esses furos são dispostos dessa forma para promover mais facilmente a geração de padrão de escoamento borbulhado. As entradas e saídas têm furos com roscas de mesmas dimensões das tubulações a que estão conectados. Após a mistura ser estabelecida, há a conexão do tubo de Inox com o *Tomoflow* (sensores em um tubo de acrílico). Esta conexão é feita com dois flanges de aço. Haverá um anel de borracha entre o flange de aço e o tubo de acrílico para evitar danos ao *Tomoflow*. Esses acessórios serão descritos detalhadamente a seguir.

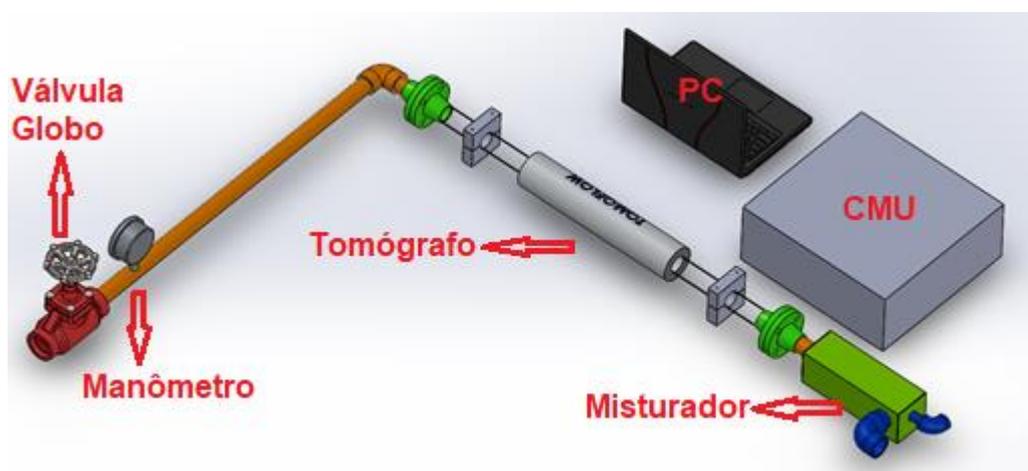
Figura 21 – Vista isométrica do misturador projetado.



Fonte: O autor (2017).

Na Figura 22, observa-se toda a linha de mistura, contendo um manômetro e uma válvula globo no final da linha, onde ocorrerá a mistura com a água para os testes a serem realizados na placa do PSHE. Vale ressaltar também que na figura são exibidos o CMU e o computador de controle do ECT.

Figura 22 – Vista isométrica do esquemático da linha bifásica, contendo equipamento do ECT.



Fonte: O autor (2017).

3.2 DESCRIÇÃO DOS PRINCIPAIS COMPONENTES

Nesta seção são descritos todos os itens utilizados na bancada, além de normas, dimensões e particularidades. Os itens são divididos em: tubulação, válvulas e filtro, equipamentos.

3.2.1 Tubulação

Na tabela abaixo são apresentados os principais componentes e características da tubulação: comprimento total aproximado de tubos, número de cotovelos, tês, flanges e reduções. Os tubos, cotovelos e tês são dimensionados de acordo com o catálogo da empresa INOX do Brasil (Anexo 7). Os flanges utilizados seguem as normas ANSI B16.5, classe 150 (Anexo 8).

Tabela 2 – Principais componentes e características referentes à tubulação da bancada multifásica.

Quantidade	Descrição
5 m	Tubo Inox 1"
1,1 m	Tubo Inox 40mm
8	Cotovelo 1"

1	Cotovelo 40 mm
1	Tê 1"
4	Flanges 2 " - CL150 ANSI B16.5 F316/F316L weld neck flange – Coriolis (Cinza) - Inox
2	Flanges de 40 mm - CL 150 ANSI weld neck Flange – Tomógrafo (Verde) - Inox
2	Flanges de 40 mm - CL 150 ANSI weld neck Flange – Tomógrafo (Verde) –Inox
4	Redução de 2" - 1" (Rosa)

Fonte: O autor (2017).

3.2.2 Válvulas e filtro

Na Tabela 3 são descritas as válvulas globo, de retenção horizontal e redutora de pressão. As normas para dimensionamento dessas válvulas também são apresentadas nessa tabela. Foram selecionadas válvulas de bronze pelo seu baixo custo e compatibilidade com o material das tubulações.

Tabela 3 – Válvulas e Filtro usados na bancada.

Quantidade	Descrição
2	Válvula de retenção horizontal com portinhola PN 16 BSP NBR 15055 - 1" (Roxo)
1	Válvula Globo Bronze PN 16 Disco PTFE BSP - 1 1/2" (Vermelho)
6	Válvula Globo Bronze PN 16 Disco PTFE BSP - 1" (Amarelo)
1	Válvula Redutora de Pressão PRV-17 - 1" (Verde Claro)
1	Filtro de ar com purgador – 1" (Azul turquesa)

Fonte: O autor (2017).

O filtro de ar será acoplado a um purgador para que seja extraído excesso de condensado na linha de ar. O mesmo opera com baixa perda de carga e em ampla faixa de vazão.

3.2.3 Equipamentos

São apresentadas, na Tabela 4, as descrições dos principais equipamentos que compõem a bancada multifásica. A bomba e compressor foram selecionados para prover uma vasta faixa de Reynolds, também satisfazendo aplicações para o trocador de calor do tipo PSHE nas plantas de óleo e gás. Os manômetros são inseridos nas linhas para facilitar a mistura entre correntes e para promover segurança dos usuários.

Tabela 4 – Descrição dos principais equipamentos e componentes da bancada de testes e suas quantidades.

Quantidade	Descrição
2	Coriolis – CMF200M - 2"
1	Tomoflow R100
5	Manômetros Analógicos
1	Bomba 1 CV BC-91 S/T 1B - Schneider - Rosa
1	Tanque 310 L Fortlev
1	Compressor CSA 8,2/25 – 2 HP
1	Misturador

Fonte: O autor (2017).

O medidor de vazão tem como princípio de operação o efeito Coriolis, correlacionando a defasagem criada na vibração do equipamento com a vazão mássica do escoamento. O modelo CMF200M tem limites de medição iguais a: 87100 kg/h (líquidos) e 10000 kg/h (gases). O tomógrafo apresenta distância média entre os planos de medição igual a 142 mm. Cada plano contém 12 eletrodos. A espessura da parede de acrílico do tomógrafo é de 5 mm.

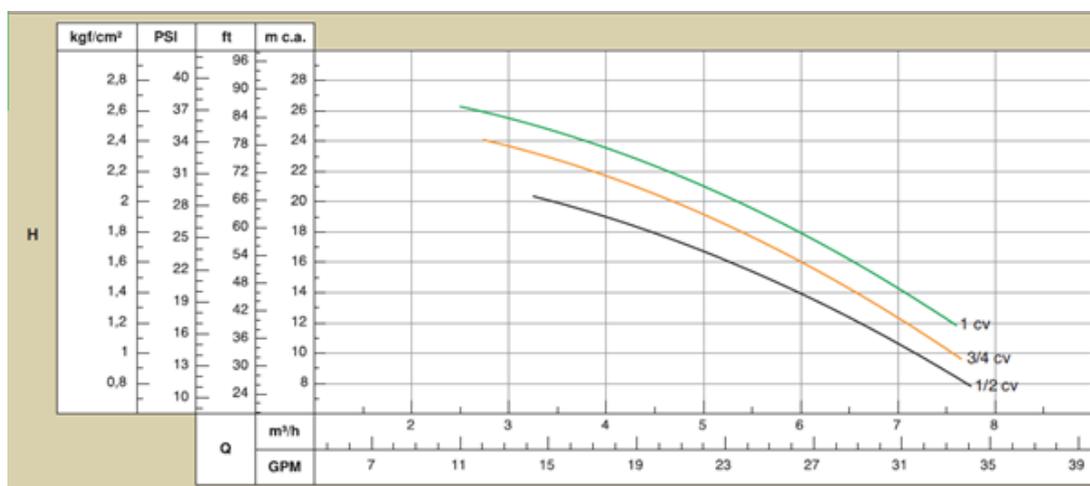
3.3 FAIXAS TERMODINÂMICAS E DE OPERAÇÃO

Nesta seção serão fornecidas as faixas de temperatura, pressão e vazão que podem ser aplicadas à bancada de testes.

A temperatura do sistema de óleo será controlada através de um banho termostático, podendo ser regulada entre 5 e 50°C. Em virtude da elevada massa específica do óleo em relação ao ar, é suposto que a temperatura da mistura ar-óleo se aproximará da temperatura de entrada do óleo. Dessa forma, o banho termostático controla de forma indireta a temperatura de mistura.

A bomba BC-91 (1 cv de potência) tem vazão máxima de 7,6 m³/h e pressão máxima de 37 psi; ver Figura 23. A vazão e pressão máximas do compressor são 14,4 m³/h e 79,7 psi, respectivamente. Para que ocorra a mistura entre as fases existentes, é imprescindível que elas estejam na mesma pressão na região do misturador. Caso haja diferença de pressão entre as linhas pode ocorrer *backflow*. A pressão desejada será selecionada de acordo com o padrão de escoamento requerido. A máxima pressão na linha de mistura será de 37 psi (limite da bomba). O controle deste parâmetro será dado pela válvula redutora de pressão e a aferição, através de manômetros. As vazões serão mensuradas através dos medidores Coriolis. A medição da vazão na região bifásica será realizada através do tomógrafo.

Figura 23 – Curvas características das bombas BC-91 com potência de 1, $\frac{3}{4}$ e $\frac{1}{2}$ cv.



Fonte: SCHNEIDER (2012).

A pressão estática até o ponto de mistura deve ser pouco afetada em virtude do comprimento desprezível em ambas as linhas e do número reduzido de perdas localizadas. Dessa forma, os limites de pressão para os testes a serem realizados correspondem, aproximadamente, aos limites impostos pela bomba e pelo compressor.

4 PROCESSAMENTO DE DADOS DO TOMÓGRAFO

Com o projeto da bancada apresentado e tendo o conhecimento das máximas vazões para cada fase a ser misturada, será descrita, nessa seção, a plataforma numérica para auxiliar no cálculo de parâmetros bifásicos oriundos do tomógrafo (e.g. velocidades, vazões, fração de vazio, parâmetros referentes à troca de calor etc). Além de recursos gráficos para análises qualitativas, será explanada a concepção do algoritmo construído, tendo como base os dados de concentrações e velocidades advindas do tomógrafo acoplado em uma bancada de testes simplificada (ver Figura 24). Posteriormente, será feita uma avaliação preliminar dos resultados obtidos.

A bancada é constituída de uma bomba (2) da marca AZOO modelo Power Head, com vazão máxima de 1800 l/h, e máxima coluna de água deslocada de 205 cm, tubos de PVC (5) e um reservatório (1). O tomógrafo ECT e a central de processamento CMU são representados pelos números 3 e 4, respectivamente.

Figura 24 – Componentes da bancada de testes simplificada para geração de dados bifásicos.



Fonte: RANGHETTI (2016).

Sabe-se previamente que, em consequência das características da bomba empregada na bancada simplificada e do ambiente no qual a bancada está exposta,

a velocidade será de baixa magnitude e, dessa forma, a troca de calor será irrisória. Isso devido as temperaturas na região interna e externa do duto são aproximadamente as mesmas e a não ocorrência da turbulência, afetando num maior gradiente de velocidade na parede do tubo. Deste modo, os resultados obtidos são para baixos números de Reynolds e Nusselt. Entretanto, como há a expectativa de grandes vazões na bancada projetada (capítulo 3), a ferramenta de análise de dados é desenvolvida de modo a satisfazer escoamentos com altas vazões e elevados números de Reynolds e Nusselt (calculados por analogia de Chilton-Colburn).

4.1 ALGORITMO DE PROCESSAMENTO DE DADOS

O algoritmo desenvolvido tem como base equações que retratam escoamentos bifásicos turbulentos em tubos. As seguintes hipóteses são adotadas: o fluido de maior permissividade é incompressível, viscoso, as flutuações das componentes de velocidade não axiais são iguais às axiais, o coeficiente de transferência de calor de escoamento bifásico pode ser correlacionado com o coeficiente de fricção através da analogia de Chilton-Colburn.

Com o auxílio do tomógrafo ECT são obtidas as concentrações e velocidades em cada pixel. O software *Flowan* disponibiliza o resultado da massa e volume global escoado no tempo de captura. A vazão volumétrica local, $q_i(t)$, é dada pela Equação 45, onde $U_i(t)$ é a velocidade local, $C_i(t)$, a concentração local e $A_i(t)$, a área do pixel.

$$q_i(t) = U_i(t)C_i(t)A_i(t) \quad (45)$$

A soma de todas as vazões locais resulta na vazão volumétrica total. A integração no tempo fornece o volume total escoado e, com a densidade do fluido mais permissível, é calculada a massa total escoada desse mesmo fluido.

Tendo como objetivo final a obtenção do número de Nusselt (ver Equação 19), necessita-se do coeficiente de fricção, e dos números de Reynolds e Prandtl do escoamento. Para estimar o coeficiente de fricção serão utilizados os pixels próximos à parede para calcular o gradiente de velocidade e, assim a tensão de cisalhamento e o coeficiente de fricção. Os gradientes de velocidade e as estatísticas do escoamento turbulento (e.g. desvio padrão) são calculados entre os pixels adjacentes à parede do tomógrafo e os anexos a eles em direção ao centro; ver Equação 46,

onde β é a distância entre os pixels adjacentes. Esses cálculos também serão utilizados para estimativas da taxa de dissipação de energia cinética turbulenta (ε), flutuação da taxa de deformação (S_{ij}), Produção (P), escalas de Kolmogorov (η e τ_η), tensão de cisalhamento (τ_w), Coeficiente de Fricção (C_f) e Nusselt (Nu).

$$\frac{DU}{Dr} = \frac{(U_{i=R} - U_{i=r})}{\beta} \quad (46)$$

O usuário também é capaz de analisar alguns desses parâmetros em um conjunto de pixels específico para cálculos locais. No Apêndice A é demonstrada essa particularidade.

Note na equação 19 que o número de Nusselt pode ser calculado de diversas formas num escoamento bifásico. Por exemplo, podemos considerar números de Reynolds, Prandtl e coeficiente de fricção bifásicos, ou calculá-los de forma pontual de acordo com a fase que se encontra na parede, utilizando Pr e Reynolds considerando apenas uma das fases escoando e proceder com uma integração no perímetro do tubo. Pelas limitações do tomógrafo, apenas as características da fase mais permissiva são obtidas com profundidade (e.g. perfis de velocidade e concentração para o óleo). Dessa forma, os valores de Reynolds e Pr são calculados segundo essas informações. É importante frisar que, em situações práticas envolvendo escoamentos de ar e óleo (fase mais permissiva), tem-se, em geral, interesse no perímetro molhado do óleo e nos seus gradientes de velocidade.

O Reynolds médio global, por exemplo, é calculado de acordo com a equação 1. Onde a velocidade é a média temporal e espacial do escoamento (ver equação 47), o diâmetro refere-se o do tomógrafo e a viscosidade é do fluido mais permissivo (óleo).

$$\bar{U} = \frac{\sum_{t=0}^{t_f} \left[\frac{\sum_{i=0}^{812} U_i(t)}{812} \right]}{t_f} \quad (47)$$

onde, t_f é o tempo final de captura e 812 é número total de pixels. Deste modo, o Reynolds é calculado como se houvesse apenas o escoamento do material mais permissivo. Hipótese admitida devido as limitações tomógrafo, os resultados serão

mais precisos quando o padrão de escoamento for borbulhado, em razão do maior percentual de líquido.

Os termos médios dos dados globais e durante os tempos t_1 e t_2 da Figura 25 são calculados com as médias temporais e espaciais (pixels). Os termos médios relacionados ao pixel são apenas médias temporais.

A energia cinética turbulenta, dada pela Equação 15, será aproximada como sendo:

$$k \approx \frac{3}{2} \sigma_U \quad (48)$$

Admitindo-se que a flutuação da velocidade é igual em cada direção do escoamento. Essa hipótese é adotada por dois motivos: de fato as flutuações possuem mesma ordem de magnitude e, mais importante, pelas limitações do tomógrafo.

A flutuação da taxa de deformação será dada como metade do gradiente do desvio padrão da velocidade, pois essa tem maior representatividade no escoamento (OLIVEIRA, 2015):

$$S_{ij} \approx \frac{1}{2} \left(\frac{d\sigma_U}{dr} \right) \quad (49)$$

A dissipação de energia cinética turbulenta será estimada utilizando dados de pixels próximos à parede, utilizando a equação padrão 16. De fato, é o local de maior dissipação num escoamento interno.

A produção de energia cinética turbulenta é dada pela Equação 18, necessitando de modelo adequado para a viscosidade turbulenta. Note que em escoamentos internos em tubos, a produção e a dissipação de energia cinética turbulenta são da mesma ordem próximo a paredes.

4.2 DETALHAMENTO DA PROGRAMAÇÃO

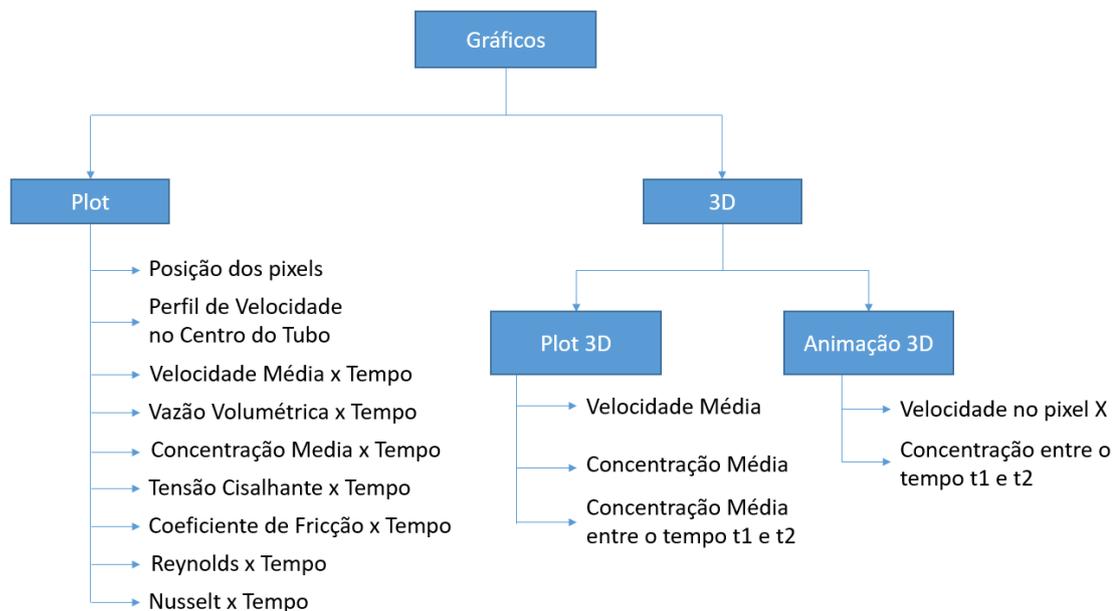
O algoritmo capaz de tratar estatisticamente escoamentos turbulentos bifásicos é apresentado a seguir. As informações de saídas são apresentadas de forma esquemática nas Figura 25 e Figura 26.

Figura 25 - Diagrama com os dados de saída do programa realizado no MATLAB para o tratamento de dados, com exceção dos gráficos.



Fonte: O autor (2017).

Figura 26 - Diagrama com os gráficos gerados pelo programa através do MATLAB possibilita que o usuário consiga sua visualização.



Fonte: O autor (2017).

Como mencionado, o tomógrafo ECT disponibiliza as concentrações e velocidades em cada zona de análise (pixel) para a fase mais permissível. Esses dados são extraídos com o auxílio do software integrado *Flowan*, no formato .csv. Formato esse que pode ser importado pelo software MATLAB. O arquivo extraído segue a configuração demonstrada na figura a seguir. A primeira coluna é relativa ao tempo de análise, as colunas em amarelo são relativas às concentrações de cada pixel nos planos 1 e 2 e as colunas em verde, às velocidades em cada pixel.

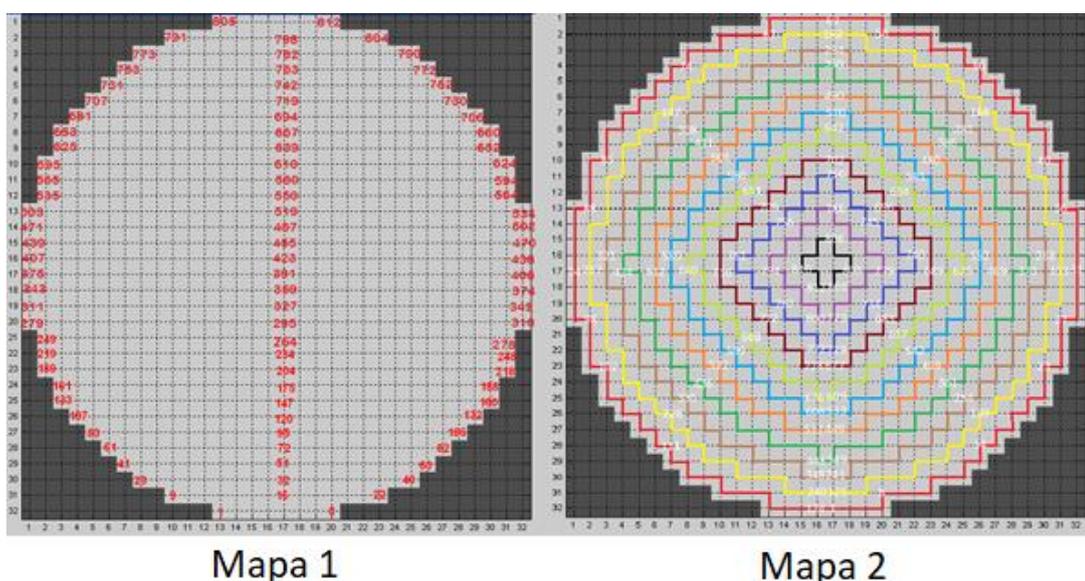
Figura 27 – Configuração do arquivo de saída da plataforma *Flowan*.

Tempo	Concentração no pixel 1 (Plano 1)	Concentração no pixel 1 (Plano 2)	Concentração no pixel 2 (Plano 1)	Concentração no pixel 2 (Plano 2)	...	Concentração no pixel N (Plano 1)	Concentração no pixel N (Plano 2)	Velocidade no Pixel 1	Velocidade no Pixel 2	...	Velocidade no Pixel N
t0											
t1											
...											
tn											

Fonte: O autor (2017).

Foram criadas duas zonas de análise: uma para análise do escoamento estratificado e outra, para o escoamento anular; ver Figura 28. Como o escoamento a ser analisado é do tipo estratificado, serão apresentados os resultados apenas para este padrão de escoamento. Porém, a base e a rotina de cálculo são similares para o padrão anular.

Figura 28 – Mapa para padrão de escoamento estratificado (1) e anular (2).



Fonte: O autor (2017).

Na Figura 29 é ilustrada a interface gráfica para o usuário. No quadro 1, encontram-se os dados de entrada do programa:

- Densidade do meio mais permissivo [kg/m^3];
- Raio do Tubo [m];
- Intervalo de tempo da análise [s];
- Pixel a ser investigado;
- Viscosidade cinemática do meio mais permissivo [m^2/s];
- Prandtl do meio mais permissivo;
- Multiplicador (M) do desvio padrão para filtragem de dados espúrios;
- Escolha do padrão de escoamento para análise.

Figura 29 – Interface gráfica para o usuário. O programa foi concebido para o tratamento estatístico de escoamentos bifásicos.



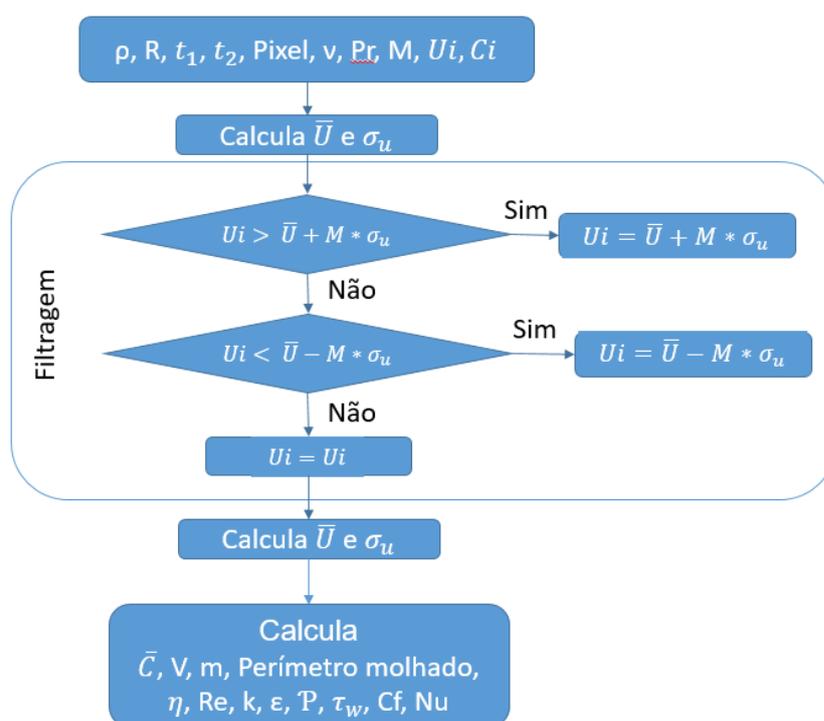
Fonte: O autor (2017).

No quadro 2 da Figura 29, encontram-se os dados gerais obtidos, explicados no fluxograma de saída (Figura 25). O mesmo ocorre no quadro 3, onde são apresentados: os resultados nos intervalos de análise especificados pelo usuário

(resultados médios), o pixel pré-estabelecido e os resultados locais nesse mesmo pixel. No Quadro 4 é exibido o perímetro molhado médio no intervalo selecionado. No quadro 5, podem ser selecionados vários tipos de gráficos e animações tridimensionais (ver Figura 26).

Foi utilizado um meio de filtragem dos dados de velocidades, ver Figura 30, na possibilidade de vetores espúrios serem gerados no processo de aquisição de dados pelo tomógrafo. Esse filtro é ajustável pelo usuário e de acordo com o multiplicador do desvio padrão inserido pelo usuário. O valor de U_i é substituído caso ele seja superior a soma da média mais M vezes o desvio padrão da velocidade ou se é inferior a subtração da média e do multiplicador M vezes o desvio padrão. O próprio software do equipamento possui filtros não especificados para visualização de dados. A implementação de um filtro em código criado em plataforma numérica qualquer é necessária devido à exportação de dados sem qualquer processamento. Uma forma de avaliar a qualidade do filtro é selecionando o multiplicador ideal que gere resultados de massa e volume escoado similares no software e no programa criado. Após a filtragem, são refeitos a média e o desvio padrão da velocidade para os cálculos dos parâmetros de escoamento.

Figura 30 – Fluxograma do funcionamento do algoritmo implementado.



Fonte: O autor (2017).

Os gradientes de velocidade e os desvios padrão são obtidos próximos à parede e onde há a presença do fluido mais permissivo. A verificação é feita em termos da concentração no mesmo tempo t . Caso seja nula, os gradientes locais são dados como nulos naquele instante.

Os resultados gerais obtidos são médias temporais e espaciais (de todos os pixels existentes). Entretanto, a massa e volume são resultados da soma de seus elementos ao longo do tempo.

O posicionamento dos vetores nos gráficos 3D e as animações foram gerados de tal forma a representar adequadamente as localizações de cada vetor de acordo com a Figura 14. Os vetores estão dispostos na região central de cada quadrado.

As animações 3D têm como saída arquivos de vídeos salvos na mesma pasta onde estão os arquivos de entrada (arquivos de medição). Foram capturadas imagens dos gráficos 3D e gravados em uma pasta criada pelo programa, gerando um vídeo de acordo com a sequência de quadros.

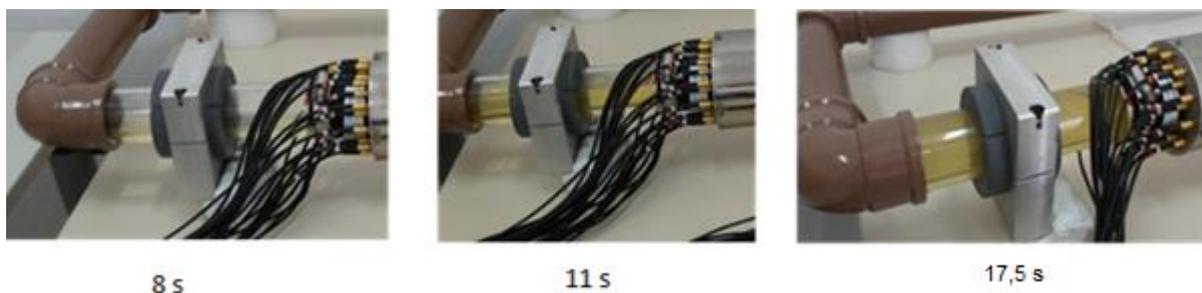
No Apêndice 10 é apresentada a implementação realizada no software MATLAB.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foi realizado um experimento para testar a rotina criada no MATLAB e comparar com os resultados fornecidos pelo software do tomógrafo, Flowan – este só apresenta dados básicos sobre concentração e velocidade das fases permissivas. O experimento também será comparado com literatura pertinente.

O ensaio realizado na bancada descrita na seção 4 ocorreu por 17,85 segundos, tendo uma média de 100 quadros por segundo de captura. Na Figura 31 é apresentado o escoamento em três tempos distintos (t): 8, 11 e 17,5 segundos. É possível observar que a fração de vazio tem grande variação nessa experimentação. Em $t = 8s$, o tubo está praticamente vazio. Em $t = 11s$ e $17,5s$, a fração de óleo é aumentada de forma significativa.

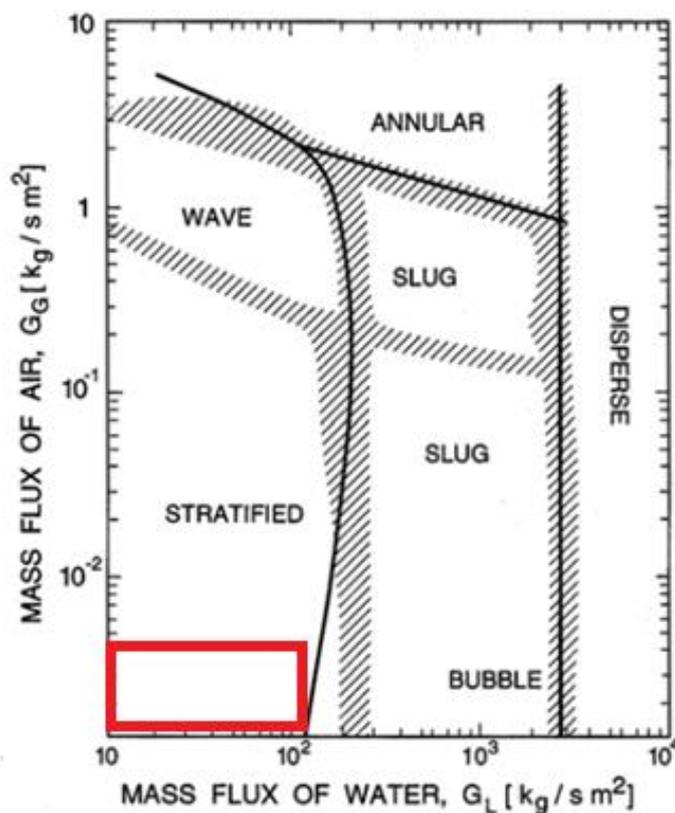
Figura 31 – Visualização do escoamento nos tempos 8, 11 e 17,5 segundos, respectivamente.



Fonte: O autor (2017).

A visualização sugere um escoamento estratificado. Tal padrão de escoamento era previsto devido aos baixos fluxos de ar e óleo na bancada simplificada. No mapa de padrões de Baker (1954), figura a seguir, destaca-se a região onde provavelmente se encontra o escoamento. Note que a bancada é desprovida de medidores individuais de vazão, não sendo possível a determinação do local correto no mapa de padrões.

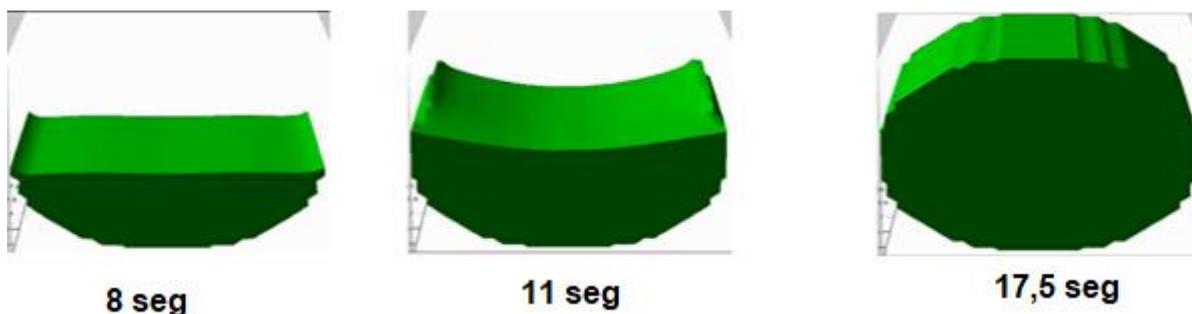
Figura 32 – Região provável no mapa de padrões onde o experimento foi realizado.



Fonte: Adaptado pelo autor de Brennen (2005, p.171).

Na Figura 33, é apresentada a reconstrução tridimensional do escoamento testado aplicado no software *Flowan*. Os tempos representados são aproximadamente os mesmos das fotos apresentadas na Figura 31.

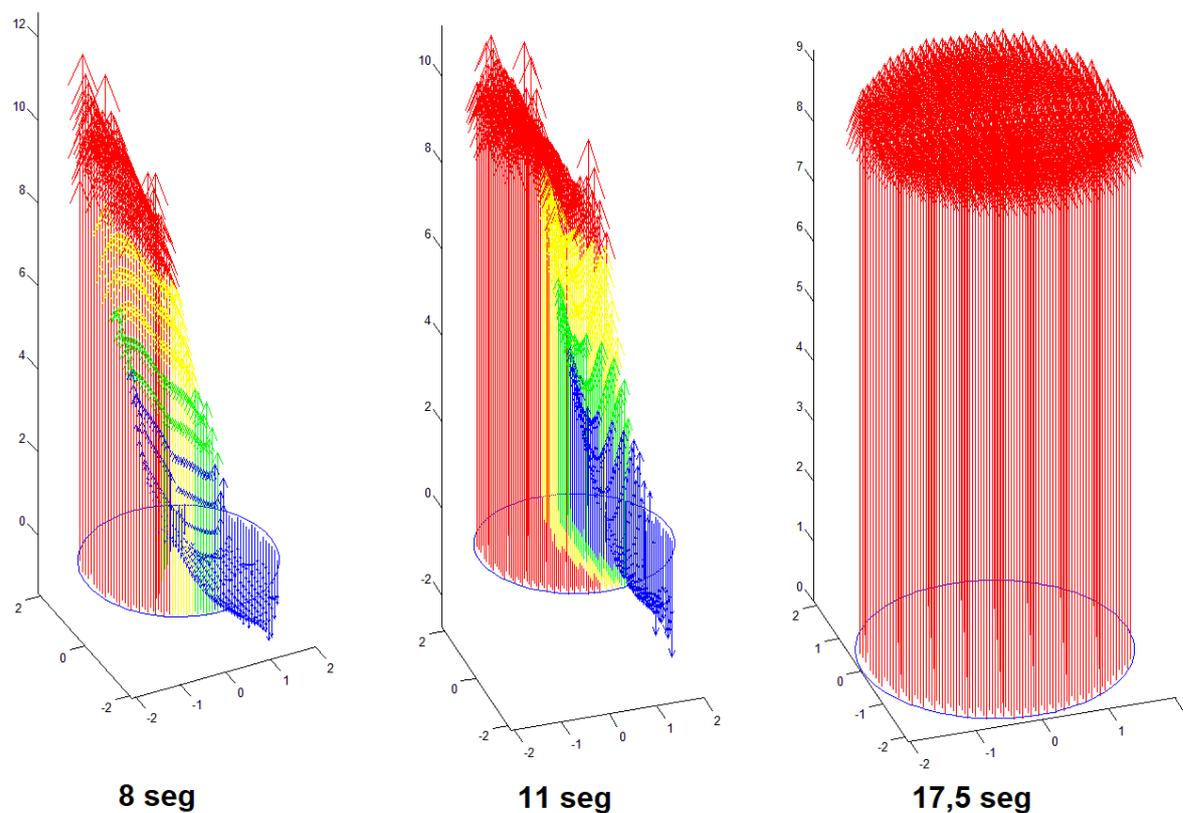
Figura 33 – Reconstrução tridimensional do escoamento realizado no Flowan.



Fonte: O autor (2017).

Na Figura 34, são expostos gráficos de concentrações instantâneas a partir do programa criado neste trabalho nos mesmos instantes de tempo. Constatase que nos tempos de 8 e 11 segundos, há a ocorrência de valores negativos de concentração na metade superior do tubo. Tratam-se de erros na medição do tomógrafo e deixam claro a necessidade de aplicação de filtros para correção dos resultados. A escala utilizada no programa varia de 0 até 10, onde 10 expressa que somente há material mais permissivo naquela região.

Figura 34 – Representação das concentrações instantâneas nos tempos 9, 11 e 17,5 segundos a partir do presente programa de análise.



Fonte: O autor (2017).

Os dados de entrada do programa (Figura 35) têm como referência o meio mais permissivo, no caso, o óleo de soja. As suas propriedades foram consideradas em temperatura ambiente de 20 °C. Os tempos de análise escolhidos foram de 9 até 13 segundos, por ser o tempo com maior mudança de concentração; ver Figura 38. Foi escolhido um pixel rente à parede, para o cálculo dos parâmetros do escoamento bifásico, apresentados na Figura 25. O padrão de escoamento selecionado é o estratificado por motivos já comentados anteriormente.

Figura 35 – Dados de entrada do programa.

Dados de Entrada	
Densidade [kg/m ³]	894
Raio do tubo [m]	0.02
Tempo 1 [s]	9
Tempo 2 [s]	13
Pixel	342
Viscosidade Cinemática [m ² /s]	3e-5
Prandtl	30
Multiplicador do desvio padrão	13
<input checked="" type="checkbox"/> Estratificado	<input type="checkbox"/> Anular
Calculate	

Fonte: O autor (2017).

O multiplicador empregue no filtro da análise corresponde ao valor 13. Esse valor foi adotado como forma de se obter a mesma massa escoada apresentada pelo software *Flowan*. De acordo com o software, o resultado do Flowan é de 1,064 kg, enquanto que no programa criado é de 1,055 kg. Note que a calibração precisa do tomógrafo e ajuste do programa desenvolvido somente será possível ao se aferir as vazões individuais anteriormente ao ponto de mistura.

Figura 36 – Dados gerais de saída do programa.

Dados de Saída Gerais	
Concentração Média (Plano 1)	0.564401
Concentração Média (Plano 2)	0.526328
Concentração Média	0.545365
Velocidade Média [m/s]	0.0977318
Vazão Média [m ³ /s]	8.14648e-08
Volume [m ³]	0.00118407
Massa [kg]	1.05856
Número de Reynolds	130.309
Energia Cinética Turbulenta [m ² /s ²]	0.34486
Dissipação de Energia Cinética Turbulenta [m ² /s ³]	1.11358
Produção de Energia Cinética Turbulenta [N/m ²]	38.0678
Tensão Cisalhante na Parede [N/m ²]	0.0794747
Coefficiente de Fricção	0.000731272
Nusselt	3.51626

Fonte: O autor (2017).

Após inseridos os dados de entrada, procede-se com a análise dos dados de saída. De acordo com a Figura 36, saída dos dados gerais, o Reynolds médio do

escoamento tem como valor 130. Isso demonstra que o escoamento medido não é turbulento. Este valor devido às características da bomba utilizada na bancada já era esperado. Também vale ressaltar que devido ao baixo Reynolds, é inviável a análise dos parâmetros de turbulência e o Nusselt (analogia de Chilton-Colburn) permitida pelo software. O projeto da bancada multifásica contempla bomba e compressor que podem gerar escoamentos turbulentos.

A equação 23, utilizada para obter a viscosidade turbulenta através do modelo $k-\epsilon$, tem como consideração o uso do valor 0,09 para o seu coeficiente, e a igualdade entre a produção e a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta. Todavia, como não temos um escoamento turbulento e devido à dificuldade de validação do código, observa-se que não há confirmação desta premissa.

Figura 37 – Perímetro molhado médio geral e durante os tempos t1 e t2.

Perímetro Molhado	
Média global	0.584533
Média durante os tempos t1 e t2	0.55667

Fonte: O autor (2017).

Parâmetro essencial de escoamento bifásico no que tange transferência de calor é a determinação do perímetro molhado. Foi obtido um percentual de 58,45% da região de fronteira fluido/estrutura ocupada pelo fluido mais permissivo. Enquanto que no tempo relativo entre 9 e 13 segundos, aproximadamente 56% era ocupado pelo óleo. Esse resultado foi similar ao apresentado pelo software Flowan.

Na Tabela 5 são exibidos todos os dados de saída do quadro 3 da Figura 29 advindos do experimento realizado. É possível notar que a massa escoada entre os tempos 9 e 13 são próximas ao total, pois é onde ocorre o maior transporte de fluido permissível, conforme a Figura 39. O mesmo vale para a vazão volumétrica média e volume escoado no mesmo intervalo acima. Valores também fornecidos para um único pixel na terceira e quarta colunas.

A velocidade média no pixel durante os tempos de 9 e 13 segundos foi maior do que a velocidade média geral nesse mesmo intervalo devido a contabilização dos valores nulos em outras regiões onde não há a presença do óleo.

Análise também é realizada com um pixel na região central do tubo (pixel 327). A velocidade média obtida nas medições desse pixel foi de 0,532 m/s, ou seja, muito próximo à velocidade da parede. Nota-se que o escoamento apesar de apresentar baixas velocidades, não está desenvolvido.

Tabela 5 – Resumo dos dados de saída do programa, contendo parâmetros em um intervalo selecionado, no pixel de estudo e neste mesmo pixel no intervalo selecionado.

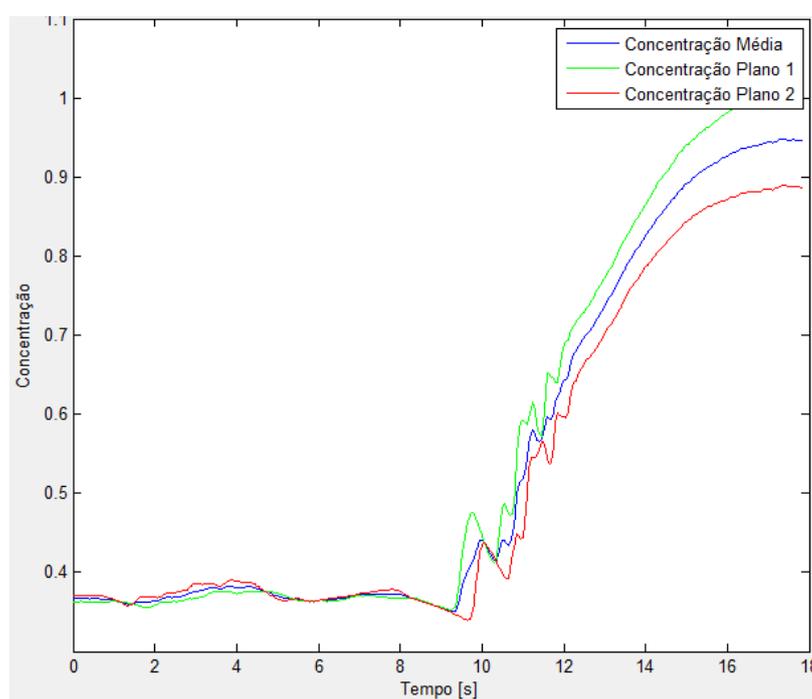
Parâmetros	Entre tempos t1 e t2	No pixel i	No pixel i durante os tempos t1 e t2
Concentração no Plano 1	0,558	0,747	0,947
Concentração no Plano 2	0,496	0,752	0,845
Concentração média	0,527	0,749	0,896
Velocidade média [m/s]	0,424	0,167	0,543
Vazão volumétrica média [m ³ /s]	0,000287	2e-7	7,25e-7
Volume Escoado [m ³]	0,00116	3,58e-6	2,94e-6
Massa Escoada [kg]	1,04	3,18e-3	0,00261
Reynolds	17,6	7,04	22,5
Energia Cinética Turbulenta [m ² /s ²]	x	0,43	x
Taxa do tensor tensão [N/m ² *s]	x	6,72	x
Dissipação de Energia Cinética Turbulenta [m ² /s ³]	x	0,00271	x
Produção de Energia Cinética Turbulenta [N/m ²]	x	89,55	x
Escala de Kolmogorov [μm]	x	0,00178	x
Escala de Kolmogorov [s]	x	0,105	x

Tensão de cisalhamento [N/m ²]	0,203	0,46	0,0104
Coeficiente de Fricção	0,00212	0,00203	0,0000462
Nusselt	0,705	0,34	0,863

Fonte: O autor (2017).

Na Figura 38 são apresentadas as concentrações médias que ocorrem durante o tempo de análise em toda a área seccional do tubo com o auxílio do programa desenvolvido. Entretanto, no *Flowan*, é possível analisar apenas em regiões específicas da seção transversal. Como forma de comparação, optou-se que a região de análise no software seria a região média superior da seção, pois é onde ocorre maior mudança de concentração.

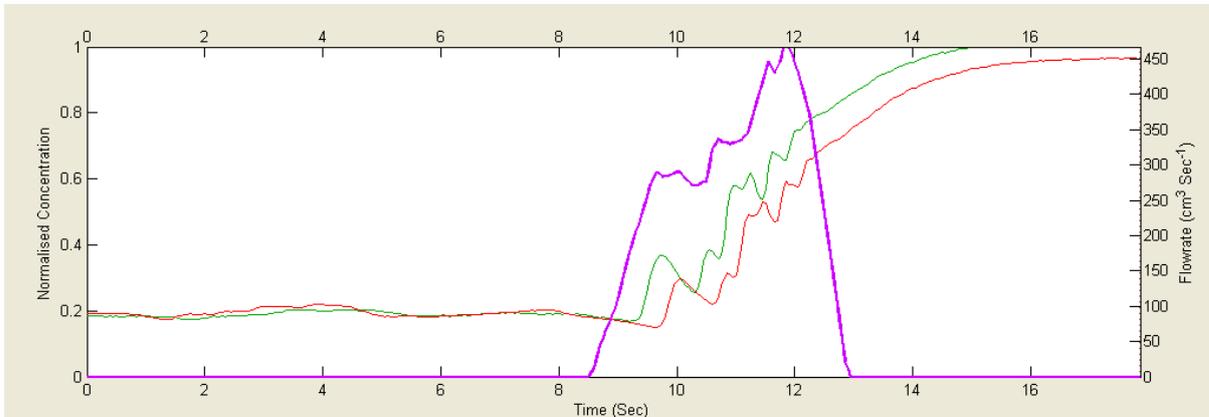
Figura 38 – Concentrações do plano 1, plano 2 e média do escoamento medido em toda a seção transversal



Fonte: O autor (2017).

Pode-se observar na Figura 39, correspondente ao software Flowan, que o preenchimento total da área ocorre aos 15 segundos no plano 1. Nesse mesmo instante, constata-se na Figura 38, que essa mesma região está totalmente completa de óleo, tendo validação entre os dois programas.

Figura 39 – Concentrações nos planos 1 e 2 (verde e vermelho) e vazão volumétrica (rosa) uma região média superior da seção transversal.

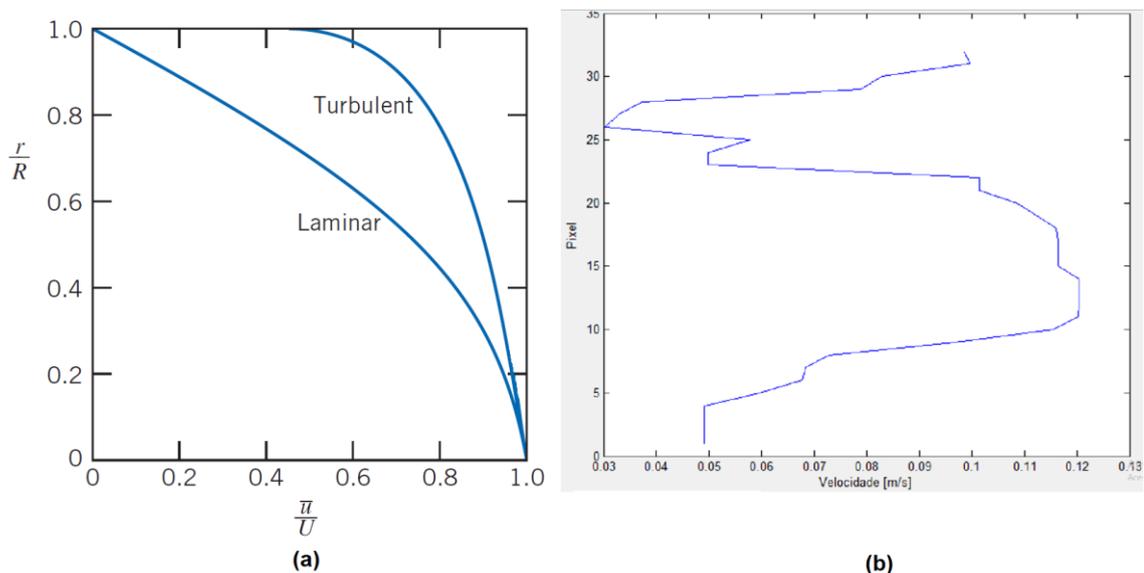


Fonte: O autor (2017).

O perfil de velocidade de um escoamento laminar monofásico é exemplificado na Figura 40.a, sendo os valores 0 e 1, no eixo vertical, as posições do centro e da parede, respectivamente. Em escoamentos turbulentos o perfil de velocidade (Figura 40.a) segue o mesmo princípio, porém o gradiente de velocidade é maior na região da parede. Este está relacionado a maior troca de calor e perda de carga, como já mencionado.

O mesmo padrão segue na Figura 40.b, onde as posições 0 e 32 (eixo das ordenadas) são referentes a parede do tubo, e a 16 o centro. Nas extremidades as velocidades do óleo são próximas a zero e no centro é máxima. Vale ressaltar que há um vale na região superior do tubo em virtude das grandes concentrações de ar, reduzindo a velocidade média do óleo quando ocorre nessa região.

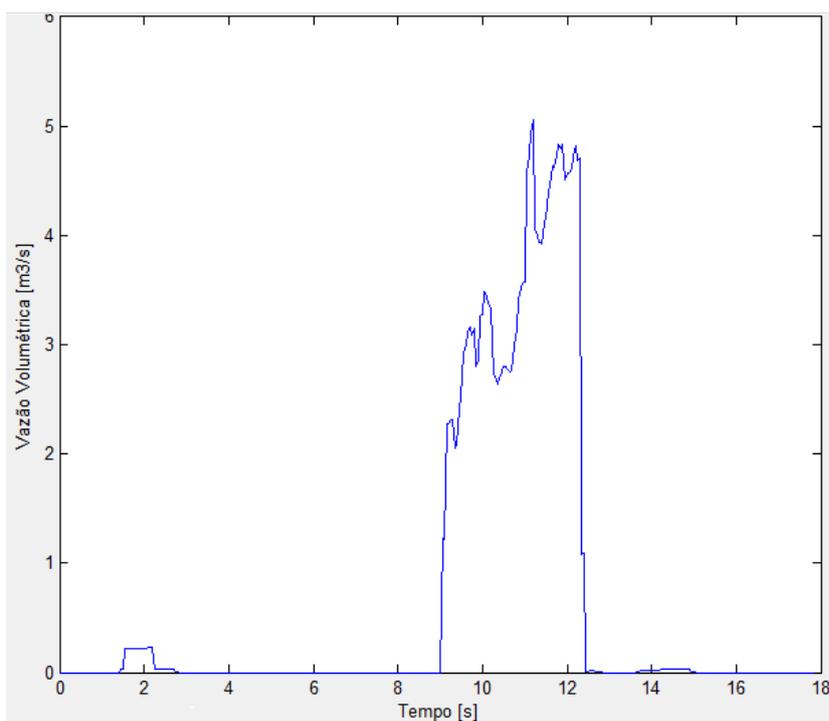
Figura 40 – Perfil de velocidade médio teórico laminar e turbulento (a) e medido (b).



Fonte: Adaptado pelo autor de PRITCHARD (2011).

O gráfico na Figura 41 demonstra a variação de vazão volumétrica no tempo, similar à Figura 39. Durante os tempos iniciais no software *flowan*, há baixa vazão de óleo. A vazão praticamente ocorre no intervalo de 9 a 13s.

Figura 41 – Vazão volumétrica do escoamento medido.



Fonte: O autor (2017).

5 CONCLUSÃO

Nesse trabalho foram retratadas as principais definições de escoamentos bifásicos gás/líquido. Assim como noções de turbulência em fluidos foram evidenciadas. Para promover a geração de escoamentos bifásicos em uma vasta gama de condições termodinâmicas foi projetada uma bancada multifásica incluindo um tomógrafo por capacitância elétrica.

Foram explanados os conceitos básicos dos elementos mecânicos presentes na bancada bifásica/multifásica: bomba, compressor, válvulas e filtro. Posteriormente, apresentou-se a associação dos conceitos de turbulência a parâmetros de transferência de calor. Também houve a explanação de noções básicas de tomografia por ECT.

O estudo foi dividido em duas partes: projeto da bancada multifásica e desenvolvimento de um programa de tratamento estatístico a partir do ECT. Sendo que a primeira parte advém de um projeto que também visa a análise de uma placa do trocador de calor PSHE em condições reais de produção na indústria de óleo e gás.

O primeiro estudo indicou que a pressão máxima na região de mistura será de 37 psi limitada pela pressão máxima proporcionada pela bomba. Todas as vazões nas linhas contendo uma fase serão medidas e reguladas pelo Coriolis e válvulas globo, respectivamente. A regulação de pressão será dada pela válvula reguladora de pressão e sua medição será feita por manômetros analógicos. Na região de mistura, houve o projeto de um misturador que facilita a geração de um padrão borbulhado. Entretanto padrões distintos podem ser obtidos através da mudança de vazão. A medição de concentração, velocidade e vazão na região bifásica será através do ECT. A temperatura da linha estará controlada através de um banho termostático presente na linha de óleo.

No que tange o processamento de dados do tomógrafo, houve a utilização de uma bancada simplificada, onde não ocorreu intensa turbulência. Deste modo, parâmetros referentes a escoamentos turbulentos calculados por programação desse

trabalho tiveram sua validação impossibilitada. Entretanto, a vazão volumétrica, a velocidade e a concentração no tubo tiveram valores semelhantes ao apresentado pelo software do tomógrafo, *Flowan*.

Com base nos gradientes de velocidades próximo a parede, é possível calcular o coeficiente de fricção local e integrá-lo no perímetro do tubo para escoamentos bifásicos. Esses dados são de difícil acesso na literatura. Além disso, é possível calcular o número de Nusselt através da analogia de Chilton-Colburn tanto para estimativas locais e globais. Houve a identificação do perímetro molhado médio total correspondendo a fotografias de um escoamento qualquer gerado no experimento simplificado.

Devido a não ocorrência de condições turbulentas, não houve a possibilidade de análise aprofundada. Logo, parâmetros como: produção e dissipação de energia cinética turbulenta, escalas de Kolmogorov e taxa do tensor de Reynolds não foram validados.

Esse trabalho contribuirá para que futuras medições de escoamentos bifásicos ocorram na bancada projetada e que sua análise seja rapidamente aprofundada com a continuação do código desenvolvido. Recomenda-se para trabalhos futuros:

- Calibrar o tomógrafo utilizando a bancada projetada e promover a adaptação necessária para a validação do programa criado. Para tal objetivo, deve-se controlar o padrão de escoamento e vazões anteriormente a mistura;
- Implementação de código para diferentes faixas de Reynolds;
- Implantar mais modelos de viscosidade turbulenta ($k-\omega$, SST, RNG $k-\epsilon$, entre outros);
- Elaborar separador de fases na bancada multifásica.

6 REFERÊNCIAS

ANDERSON, Carl N. et al. **Pumping Station Design**. 3. ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 2008.

BORTOLIN, Eduardo. **Dimensionamento de um sistema de ar comprimido para uma empresa de pequeno porte**. 2014. 45 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade Horizontina, Horizontina, 2014.

BOSCH, Robert. **Tecnologia de ar comprimido**. Campinas: Bosch, 2008.

Disponível em:

<http://www.bosch.com.br/br/ferramentas_pneumaticas/produtos/downloads/Manual_Pneumatica_ARComprimido.pdf>. Acesso em: 10 out. 2017.

BRASIL, Alex Nogueira. **Bombas - Classificação e descrição**. Belo Horizonte: Texto, 2013. Color. Disponível em:

<http://www.alexbrasil.com.br/_upload/d11a6c301c7df39dbf941f0ecdf843f6.pdf>. Acesso em: 18 out. 2017.

BRENNEN, Christopher E. **Fundamentals of Multiphase Flows**. Pasadena: Cambridge University Press, 2005.

ÇENGEL, Yunus A. **Heat transfer: A Practical Approach**. 2. ed. Nova Iorque: Mcgraw-hill, 2002.

CFDSUPPORT. **Laminar vs. Turbulent Flow**. Disponível em:

<<https://www.cfdsupport.com/OpenFOAM-Training-by-CFD-Support/node275.html>>. Acesso em: 10 out. 2017.

COLLIER, John G.; THOME, John R. **Convective Boiling and Condensation**. New York: Oxford, 1994.

DISCONZI, Fernanda Perazzolo. **Análise numérica da transferência de calor no interior de cilindros de compressores alternativos de refrigeração doméstica.**

2011. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

DOCOL. **PRODUTOS:** Válvula de Retenção Horizontal. Disponível em:

<<https://www.docol.com.br/pt/produto/valvula-de-retencao-horizontal-3-4-quot>>.

Acesso em: 08 out. 2017.

EGER, Roger Schipmann. **Modelação de escoamentos turbulento.** 2010. 126 f.

Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

EMMETI. **Válvula redutora de pressão.** Disponível em:

<<http://www.emmeti.com.br/produtos/agua/item/valvula-redutora-de-pressao-p25>>.

Acesso em: 09 out. 2017.

FALCONE, Gioia et al. Multiphase flow metering: current trends and future developments. **Journal Of Petroleum Technology.** Dallas, p. 77-84. abr.2002.

Disponível em:

<https://www.researchgate.net/profile/Gioia_Falcone/publication/241783661_Multiphase_Flow_Metering_Current_Trends_and_Future_Developments/links/5438b4d30cf204cab1d6d912/Multiphase-Flow-Metering-Current-Trends-and-Future-Developments.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2017.

FORSTHOFFER, William E. **Forsthoffer's Rotating Equipment**

Handbooks. Philadelphia: Elsevier Science, 2007.

GOUVEA, Marcos Martins Rezende de. **Estudo de confiabilidade em bombas centrífugas.** 2008. 48 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade São Francisco, Campinas, 2008.

INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer.** 6. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.

KLEMEŁ, Jiří Jaromír et al. **Compact Heat Exchanger for Energy Transfer Intensification**. Boca Raton: Crc Press, 2016.

KOLMOGOROV, A. N. **Equations of turbulent flow of an incompressible viscous liquid**. Journal of Physics - USSR 6 (5), pp 227-228, 1942.

MIPEL. **Válvula - Globo**. Disponível em:
<http://www.mipel.com.br/default.asp?action=pr_industrial&codigo_b=101>. Acesso em: 9 out. 2017.

NETTO, José M. de. A. **Manual de hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998.

NICSA. **Filtros para ar comprimido**. Disponível em:
<<http://www.nicsa.com.br/filtros-ar-comprimido>>. Acesso em: 20 out. 2017.

NOWAK. **Compressor de Ar**: Motocompressor de ar Schulz 25 litros - 8.2 Pés 220v. Disponível em: <<http://www.nowak.com.br/compressor-de-ar/compressor-de-ar-profissional/motocompressor-de-ar-schulz-25-litros-8-2-pcm-220v-2hp-monofasico-linha-hobby-csa-8-2-25-ref-98016>>. Acesso em: 20 out. 2017.

OLIVEIRA, Jorge L. G. **Medição de vazão de escoamentos bifásicos utilizando tubo de Venturi ou placa de orifício associados a um sensor de fração de vazio com campo elétrico girante**. 2007. 116p. Dissertação – Programa de pós-graduação em engenharia mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis. 2007.

OLIVEIRA, Jorge Luiz Goes. **Particle-Laden Turbulent Pipe Flows**. Düsseldorf: Scholars' Press, 2015.

PAIVA, Kleber Vieira de et al. **Análise térmica e hidrodinâmica de permutadores de calor do tipo casco e placas**. Joinville: Grupo T2F, 2017.

PARISHER, Roy A.; RHEA, Robert A. **Pipe Drafting and Design**. 2. ed. Oxford: Gulf Professional Publishing, 2002.

PEREIRA, Matheus Fontanelle. **Determinação das vazões em escoamentos bifásicos arágua por meio de tubo venturi e medidor de fração de vazão**. 2006. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

POPE, Stephen B. **Turbulent Flows**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

PRITCHARD, Philip J. **Fox and mcdonald's introduction to fluid mechanics**. 8. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.

PROCESS TOMOGRAPHY (United Kingdom). **Electrical capacitance tomography system: Fundamentals of ECT**. Wilmslow: Process Tomography Ltd, 2009.

RANGHETTI, Rafael. **Caracterização de escoamentos bifásicos através de tomografia de capacitância elétrica**. 2016. 63 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016.

REYNOLDS, O. **An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and the law of resistance in parallel channels**. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Londres. vol 174. p 935–982.1883.

ROCHA, M. S.; SIMOES-MOREIRA, J. R.. Void Fraction Measurement and Signal Analysis from Multiple-Electrode Impedance Sensors. **Heat Transfer Engineering**. São Paulo, p. 924-935. 07 out. 2008. Disponível em: <<http://www.usp.br/sisea/wp-content/uploads/2014/05/Void-Fraction-Measurement-and-Signal-Analysis-from-Multiple-Electrode-Impedance-Sensors.pdf>>. Acesso em: 05 out. 2017.

SCHNEIDER. **Curvas BC-91 S/T**. Joinville: Schneider, 2012. Disponível em: <<http://www.schneider.ind.br/media/203173/Curvas-BC-91.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2017.

SEIXLACK, Andre Luiz. **Modelagem do escoamento bifásico em tubos capilares tese**. 1996. 175 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996.

SILVA, Elinaldo Santos. **Estudo do escoamento bifásico em risers em movimento na produção marítima de petróleo em águas profundas**. 2006. 90 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Petróleo, Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2006.

SILVA, Karla. **Válvulas**. Campo Mourão: Slide, 2011. 43 slides, color. Disponível em: <http://paginapessoal.utfpr.edu.br/karla/instalacoes-industriais/prova-1/Aula3_Valvulas_e_Acessorios.pdf/at_download/file>. Acesso em: 02 out. 2017.

SILVESTRIN, André Szczepanski. **Proposta de melhoria operacional no sistema integrado de distribuição de água para redução dos custos com energia elétrica**. 2012. 86 f. Monografia (Especialização) - Curso de Automação Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

SMITH, Peter; ZAPPE, R.W. **Valve Selection Handbook**. 5. ed. Oxford: Gulf Professional Publishing, 2004.

SMITH, Ricky; MOBLEY, R. Keith. **Industrial Machinery Repair**. Oxford: Butterworth Heinemann, 2003. 552 p.

SOUZA, Raquel G. S. de. **Escoamento bifásico líquido-gás: previsão de gradientes de pressão com a correlação de lockhart & martinelli e fluidodinâmica computacional**. 2009. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.

TOMOFLOW LTD (United Kingdom). **User Manual Tomoflow: Flowan v1.33.**
Dorchester: Tomoflow Ltd, 2003.

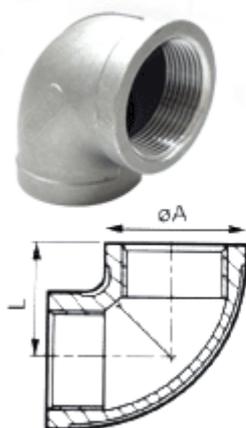
TSUTIYA, Milton T. **Abastecimento de água.** 1. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.

WHALLEY, P. B. **Boiling, Condensation, and Gas-Liquid Flow.** The Oxford Engineering Science Series, 1987.

7 ANEXO A – COTOVELO, TÊ E TUBOS

Dimensões dos cotovelos, tê e tubos utilizados no projeto da bancada. Foi empregado diâmetro de 1" e tubos com espessura de 2mm. Na concepção do misturador foi proposto um tubo externo de seção quadrada de 100x100 mm².

ACI-1
Cotovelo 90° Fêmea

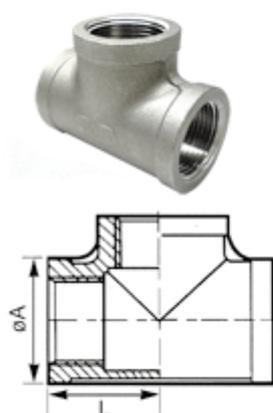


Unid: mm

ACI-1 / Cotovelo 90° Fêmea

Ø	ØA	L
1/8"	18.0	17.6
1/4"	21.3	20.0
3/8"	23.5	21.3
1/2"	29.0	27.0
3/4"	35.0	33.0
1"	43.0	38.0
1-1/4"	52.0	45.0
1-1/2"	58.0	50.0
2"	71.0	58.0
2-1/2"	86.5	69.3
3"	99.0	77.5
4"	125.0	97.3

ACI-2
Tê 90° c/
Roscas Fêmea



Unid: mm

ACI-2 / TE 90° c/ Roscas Fêmea

Ø	ØA	L
1/8"	18.0	17.0
1/4"	21.3	21.0
3/8"	23.5	23.6
1/2"	30.8	28.5
3/4"	37.0	33.4
1"	43.5	37.5
1-1/4"	54.5	44.5
1-1/2"	62.0	49.5
2"	74.8	57.0
2-1/2"	86.6	68.7
3"	99.2	77.8
4"	125.0	97.0

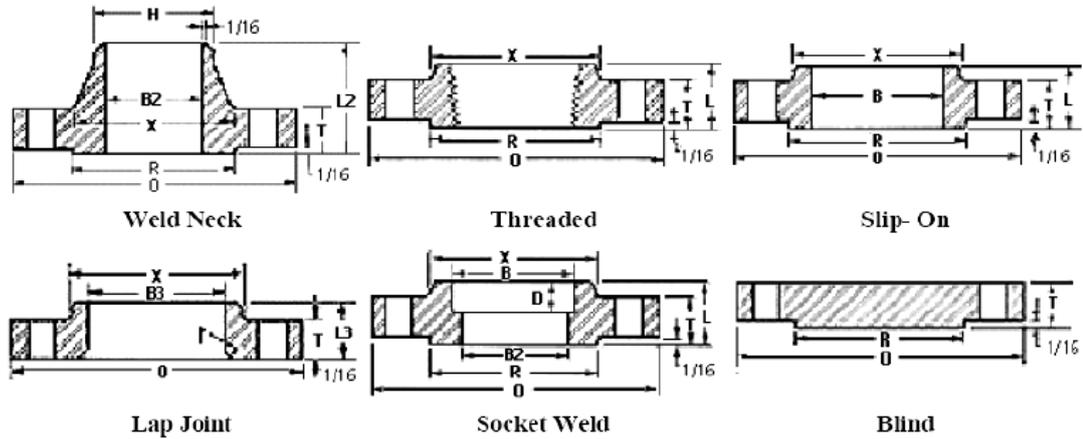
Diámetro Externo (mm)	Paredes (mm)	Peso Kgm	Diámetro Externo (mm)	Paredes (mm)	Peso Kgm
12.7	1.00	0.32	50.8	2.50	3.20
12.7	1.25	0.40	50.8	3.00	4.09
15.9	1.00	0.40	57.0	1.00	1.44
15.9	1.25	0.51	57.0	1.25	1.83
15.9	1.50	0.63	57.0	1.50	2.29
19.0	1.00	0.48	57.0	2.00	2.88
19.0	1.25	0.61	57.0	2.50	3.60
19.0	1.50	0.76	57.0	3.00	4.60
21.3	1.00	0.53	60.3	1.00	1.52
21.3	1.25	0.68	60.3	1.25	1.93
21.3	1.50	0.85	60.3	1.50	2.42
22.2	1.00	0.56	60.3	2.00	3.04
22.2	1.25	0.71	60.3	2.50	3.80
22.2	1.50	0.88	60.3	3.00	4.86
22.2	2.00	1.10	63.5	1.00	1.60
25.4	1.00	0.64	63.5	1.25	2.03
25.4	1.25	0.81	63.5	1.50	2.54
25.4	1.50	1.02	63.5	2.00	3.20
25.4	2.00	1.28	63.5	2.50	4.00
25.4	2.50	1.60	63.5	3.00	5.12
26.7	1.00	0.67	73.0	1.00	1.84
26.7	1.25	0.85	73.0	1.25	2.33
26.7	1.50	1.07	73.0	1.50	2.92
26.7	2.00	1.34	73.0	2.00	3.68
26.7	2.50	1.68	73.0	2.50	4.60
28.0	1.00	0.71	73.0	3.00	5.88
28.0	1.25	0.91	76.2	1.00	1.92
28.0	1.50	1.14	76.2	1.25	2.44
28.0	2.00	1.44	76.2	1.50	3.05
28.0	2.50	1.79	76.2	2.00	3.85
28.0	3.00	2.30	76.2	2.50	4.80
31.8	1.00	0.80	76.2	3.00	6.15
31.8	1.25	1.01	80.0	1.00	2.02
31.8	1.50	1.27	80.0	1.25	2.56
31.8	2.00	1.60	80.0	1.50	3.20
31.8	2.50	2.00	80.0	2.00	4.05
31.8	3.00	2.50	80.0	2.50	5.05
33.4	1.00	0.84	80.0	3.00	6.46
33.4	1.25	1.07	88.9	1.00	2.24
33.4	1.50	1.34	88.9	1.25	2.84
33.4	2.00	1.68	88.9	1.50	3.55
33.4	2.50	2.10	88.9	2.00	4.47
33.4	3.00	2.68	88.9	2.50	5.60
38.1	1.00	0.96	88.9	3.00	7.16
38.1	1.25	1.22	101.6	1.00	2.55
38.1	1.50	1.52	101.6	1.25	3.24
38.1	2.00	1.92	101.6	1.50	4.06
38.1	2.50	2.40	101.6	2.00	5.10
38.1	3.00	3.07	101.6	2.50	6.40
42.2	1.00	1.06	101.6	3.00	8.20
42.2	1.25	1.35	108.0	1.00	2.71
42.2	1.50	1.69	108.0	1.25	3.45
42.2	2.00	2.12	108.0	1.50	4.32
42.2	2.50	2.65	108.0	2.00	5.43
42.2	3.00	3.40	108.0	2.50	6.81
44.5	1.00	1.12	108.0	3.00	8.72
44.5	1.25	1.42	114.3	1.00	2.88
44.5	1.50	1.78	114.3	1.25	3.66
44.5	2.00	2.24	114.3	1.50	4.58
44.5	2.50	2.80	114.3	2.00	5.76
44.5	3.00	3.58	114.3	2.50	7.20
48.3	1.00	1.21	114.3	3.00	9.23
48.3	1.25	1.54	127.0	1.00	3.20
48.3	1.50	1.93	127.0	1.25	4.05
48.3	2.00	2.42	127.0	1.50	5.07
48.3	2.50	3.03	127.0	2.00	6.38
48.3	3.00	3.88	127.0	2.50	8.00
50.8	1.00	1.28	127.0	3.00	10.20
50.8	1.25	1.63	133.0	1.00	3.36
50.8	1.50	2.04	133.0	1.25	4.25
50.8	2.00	2.56			

Quad./Retang.	Espessura					
	1,00	1,20	1,50	2,00	2,50	3,00
20x20	0,612	0,729	0,9	-	-	-
25x25	0,772	0,92	1,139	-	-	-
30x30	0,931	1,111	1,378	-	-	-
35x35	1,09	1,302	1,617	2,131	-	-
40x40	1,25	1,494	1,856	2,449	-	-
50x50	1,568	1,876	2,334	3,087	-	-
60x60	-	-	2,812	3,724	4,624	-
80x80	-	-	3,768	4,999	6,217	-
100x100	-	-	-	6,274	7,811	9,335
20x10	0,453	0,538	0,661	0,856	-	-
30x20	0,772	0,92	1,139	1,493	-	-
40x20	0,931	1,111	1,139	-	-	-
40x30	1,09	1,302	1,617	-	-	-
50x20	1,09	1,302	1,617	-	-	-
50x30	1,25	1,494	1,856	2,449	-	-
60x40	2,334	3,087	3,827	-	-	-
80x40	-	-	2,812	3,724	4,624	-
80x60	-	-	3,29	4,362	5,421	-
100x40	-	-	-	4,362	5,421	6,467
100x60	-	-	-	4,999	6,217	7,423
100x80	-	-	-	5,636	7,014	8,379

8 ANEXO B – FLANGE ANSI B16.5 CLASSE 150

Os flanges aplicados nas conexões foram do tipo Weld Neck.

ANSI B16.5 Class 150 Flanges



Nom. Pipe Size	O	T1	R	X	No. 2/Dia. of Holes	Bolt Circle Dia.	L21	H	B23	L	B	r	L34	B3	D
1/2	3.50	0.44	1.38	1.19	4-0.62	2.38	1.88	0.84	0.62	0.62	0.88	0.12	0.62	0.90	0.38
3/4	3.88	0.50	1.69	1.50	4-0.62	2.75	2.06	1.05	0.82	0.62	1.09	0.12	0.62	1.11	0.44
1	4.25	0.56	2.00	1.94	4-0.62	3.12	2.19	1.32	1.05	0.69	1.36	0.12	0.69	1.38	0.50
1-1/4	4.62	0.62	2.50	2.31	4-0.62	3.50	2.25	1.66	1.38	0.81	1.70	0.19	0.81	1.72	0.56
1-1/2	5.00	0.68	2.88	2.56	4-0.62	3.88	2.44	1.90	1.61	0.88	1.95	0.25	0.88	1.97	0.62
2	6.00	0.75	3.62	3.06	4-0.75	4.75	2.50	2.38	2.07	1.00	2.44	0.31	1.00	2.46	0.69
2-1/2	7.00	0.88	4.12	3.56	4-0.75	5.50	2.75	2.88	2.47	1.12	2.94	0.31	1.12	2.97	0.75
3	7.50	0.94	5.00	4.25	4-0.75	6.00	2.75	3.50	3.07	1.19	3.57	0.38	1.19	3.60	0.81
3-1/2	8.50	0.94	5.50	4.81	8-0.75	7.00	2.81	4.00	3.55	1.25	4.07	0.38	1.25	4.10	0.88
4	9.00	0.94	6.19	5.31	8-0.75	7.50	3.00	4.50	4.03	1.31	4.57	0.44	1.31	4.60	0.94
5	10.00	0.94	7.31	6.44	8-0.88	8.50	3.50	5.56	5.05	1.44	5.66	0.44	1.44	5.69	0.94
6	11.00	1.00	8.50	7.56	8-0.88	9.50	3.50	6.63	6.07	1.56	6.72	0.50	1.56	6.75	1.06
8	13.50	1.12	10.62	9.69	8-0.88	11.75	4.00	8.63	7.98	1.75	8.72	0.50	1.75	8.75	1.25
10	16.00	1.19	12.75	12.00	12-1.00	14.25	4.00	10.75	10.02	1.94	10.88	0.50	1.94	10.92	1.31
12	19.00	1.25	15.00	14.38	12-1.00	17.00	4.50	12.75	12.00	2.19	12.88	0.50	2.19	12.92	1.56
14	21.00	1.38	16.25	15.75	12-1.12	18.75	5.00	14.00	13.25	2.25	14.14	0.50	3.12	14.18	1.63
16	23.50	1.44	18.50	18.00	16-1.12	21.25	5.00	16.00	15.25	2.50	16.16	0.50	3.44	16.19	1.75
18	25.00	1.56	21.00	19.88	16-1.25	22.75	5.50	18.00	17.25	2.69	18.18	0.50	3.81	18.20	1.94
20	27.50	1.69	23.00	22.00	20-1.25	25.00	5.69	20.00	19.25	2.88	20.20	0.50	4.06	20.25	2.13
22	29.50	1.81	25.25	24.25	20-1.38	27.25	5.88	22.00	21.25	3.13	22.22	0.50	4.25	22.25	2.38
24	32.00	1.88	27.25	26.12	20-1.38	29.50	6.00	24.00	23.25	3.25	24.25	0.50	4.38	24.25	2.50

Dimensions in inches.

9 APÊNDICE A – PIXELS ADJACENTES À PAREDE

O usuário deve selecionar como dado de entrada o pixel que ele requer informações. Entretanto, não são todos os pixels que retêm todas as informações possíveis para cálculo de propriedades turbulentas. Alguns dados de saída referentes à turbulência e à troca de calor só podem ser analisados nos pixels adjacentes à parede do tubo.

Pixels adjacentes a parede no escoamento estratificado

```
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 19 20 21 22 23 24 25 38 39 40 41 42 59 60 61 62
81 82 83 84 105 106 107 108 131 132 133 134 159 160 161 188 189 190 217 218
219 248 249 278 279 280 309 310 311 342 343 374 375 406 407 438 439 470 471
502 503 504 533 534 535 564 565 594 595 596 623 624 625 652 653 654 679 680
681 682 705 706 707 708 729 730 731 732 751 752 753 754 771 772 773 774 775
788 789 790 791 792 793 794 801 802 803 804 805 806 807 808 809 810 811 812
```

Pixels relacionados próximos aos adjacentes a parede no escoamento estratificado

```
13 13 14 15 16 17 18 18 26 27 28 29 34 35 36 37 43 44 45 56 57 58 63 64 79
80 85 86 103 104 109 110 129 130 135 136 157 158 162 163 186 187 191 216
220 221 246 247 250 277 281 308 312 312 313 340 341 341 344 373 373 376 406
408 437 440 469 472 472 473 500 501 504 532 536 563 566 567 592 593 596 622
626 627 650 651 655 656 677 678 683 684 703 704 709 710 727 728 733 734 749
750 755 756 757 768 769 770 776 777 778 779 784 785 786 787 795 795 796 797
798 799 800 800
```

10 APÊNDICE B – CÓDIGO FONTE DA ANÁLISE DO ESCOAMENTO

Nesse apêndice é apresentado o código fonte referente ao software mencionado no capítulo 4 do trabalho. A rotina foi dividida em 10 arquivos com o intuito de facilitar o entendimento do problema. Havendo alguns comentários no código quando é necessário

O arquivo *test2.m*, trata-se do formato *guide* do MATLAB, no qual reúne todas outras rotinas subsequentes. Algumas funções são padrões, quando a interface é criada. Essas não são discutidas e expostas nesse texto. Outras funções utilizadas não serão apresentadas, pois complementa compreensão apenas do sistema em relação à manipulação do sistema.

test2.m

```
function varargout = test2(varargin)

% TEST2 MATLAB code for test2.fig

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @test2_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @test2_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Execução quando a janela do programa for aberta
function test2_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

% Choose default command line output for test2
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
```

```

if strcmp(get(hObject,'Visible'),'off')
    im = imread('position.bmp'); %exibição da figura com as posições dos
pixels
    axes(handles.axes2);
    image(im);
    im2 = imread('T2F.bmp'); %Exibição da figura do T2F
    axes(handles.T2F);
    image(im2);

end

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = test2_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

function density_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function density_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function R_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function R_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function volume_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function volume_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Execução quando o botão calcular é pressionado.
function calculate_Callback(hObject, eventdata, handles)

%Dados de Entrada
density=str2num(get(handles.density,'String'));
R=str2num(get(handles.R,'String'));
t1=str2num(get(handles.t1,'String'));
t2=str2num(get(handles.t2,'String'));
pixel=str2num(get(handles.pixel,'String'));
StandDev=str2num(get(handles.StandDev,'String'));

```

```

kinvisc=str2num(get(handles.kinvisc,'String'));
Pr=str2num(get(handles.Pr,'String'));

%Funções para calcular os dados globais
if (get(handles.Annular,'Value')==get(handles.Annular,'Max'))
    [totalmeanconplan1,totalmeanconplan2,totalmeancon,totalmeanvel,...

avegflowrate,volume,mass,pixwallcon,pixwallcondurt1t2]=mainresultsannular(d
ensity,R,t1,t2,pixel,StandDev,Pr,kinvisc);
elseif (get(handles.Stratified,'Value')==get(handles.Stratified,'Max'))
    [totalmeanconplan1,totalmeanconplan2,totalmeancon,totalmeanvel,...

avegflowrate,volume,mass,pixwallcon,pixwallcondurt1t2,kmed,epsmed,P,tauwmed
,Ret,Cfmed,Numed]=mainresults(density,R,t1,t2,pixel,StandDev,Pr,kinvisc);

end

%Dados de Saída Globais
set(handles.avegconplan1out,'String',totalmeanconplan1);
set(handles.avegconplan2out,'String',totalmeanconplan2);
set(handles.avegconout,'String',totalmeancon);
set(handles.avegvelout,'String',totalmeanvel);
set(handles.avegflowrateout,'String',avegflowrate);
set(handles.volume,'String',volume);
set(handles.mass,'String',mass);
set(handles.pixwallcon,'String',pixwallcon);
set(handles.pixwallcondurt1t2,'String',pixwallcondurt1t2);
set(handles.kmed,'String',kmed);
set(handles.epsmed,'String',epsmed);
set(handles.Pmed,'String',P);
set(handles.tauwmed,'String',tauwmed);
set(handles.Ret,'String',Ret);
set(handles.Cfmed,'String',Cfmed);
set(handles.Numed,'String',Numed);

function t1_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function t1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function t2_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function t2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function pixel_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function pixel_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on selection change in popupmenu4.
function popupmenu4_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function popupmenu4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Execução quando o usuário escolhe o tipo de gráfico e pressiona o
% botão Update
function Updatepushbutton_Callback(hObject, eventdata, handles)

%Dados de Entrada
axes(handles.axes2);
cla;
density=str2num(get(handles.density,'String'));
R=str2num(get(handles.R,'String'));
t1=str2num(get(handles.t1,'String'));
t2=str2num(get(handles.t2,'String'));
pixel=str2num(get(handles.pixel,'String'));
StandDev=str2num(get(handles.StandDev,'String'));
kinvisc=str2num(get(handles.kinvisc,'String'));
Pr=str2num(get(handles.Pr,'String'));

%Função para criar os dados das funções
if (get(handles.Annular,'Value')==get(handles.Annular,'Max'))
    [cenvel,vertpix,time,avegvelpt,matrixvel,totalflowrate,frp1,frp2,...
avegconpt,avegconplan1pt,avegconplan2pt,matrixconplan1,matrixconplan2]=plot
graphsannular(density,R,t1,t2,pixel,StandDev,Pr,kinvisc);

elseif (get(handles.Stratified,'Value')==get(handles.Stratified,'Max'))
    [cenvel,vertpix,time,avegvelpt,matrixvel,totalflowrate,frp,frp1,frp2,...
avegconpt,avegconplan1pt,avegconplan2pt,matrixconplan,matrixconplan1,matrix
conplan2,poswp,vectime,tauw,Cf,Re,Nu,t1t,t2t]=plotgraphs(density,R,t1,t2,pi
xel,StandDev,Pr,kinvisc);
end

%plot das variáveis advindas das funções anteriores
popup_sel_index = get(handles.popupmenu4, 'Value');
switch popup_sel_index
    case 1
        if (get(handles.Annular,'Value')==get(handles.Annular,'Max'))
            im = imread('positionan.bmp');
        elseif
            (get(handles.Stratified,'Value')==get(handles.Stratified,'Max'))
            im = imread('position.bmp');

```

```

end
image(im);
case 2
plot(cenvel, vertpix);
xlabel('Velocidade [m/s]')
ylabel('Pixel')
case 3
plot(time, avegvelpt);
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Velocidade [m/s]')
case 4
plot(time, totalflowrate);
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Vazão Volumétrica [m3/s]')
case 5
plot (time, avegconpt)
hold on
plot (time, avegconplan1pt, 'color', 'g')
hold on
plot (time, avegconplan2pt, 'color', 'r')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Concentração')
legend('Concentração Média', 'Concentração Plano 1', 'Concentração
Plano 2')
case 6
plot (time, mean (tauw, 2));
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Tensão de cisalhamento na parede [N/m2]')
case 7
plot (time, mean (Cf, 2));
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Coeficiente de Fricção')
case 8
plot (time, mean (Re, 2));
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Número de Reynolds')
case 9
plot (time, mean (Nu, 2));
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Número de Nusselt')
case 10
plot (vectime, mean (matrixvel (t1t:t2t, :), 2));
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Velocidade [m/s]')
case 11
plot (vectime, totalflowrate (t1t:t2t));
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Vazão Volumétrica [m3/s]')
case 12
plot (vectime, mean (matrixconplan (t1t:t2t, :), 2))
hold on
plot (vectime, mean (matrixconplan1 (t1t:t2t, :), 2), 'color', 'g')
hold on
plot (vectime, mean (matrixconplan2 (t1t:t2t, :), 2), 'color', 'r')
xlabel('Tempo [s]')
ylabel('Concentração')
legend('Concentração Média', 'Concentração Plano 1', 'Concentração
Plano 2')
case 13
plot (vectime, mean (tauw (t1t:t2t, :), 2));
xlabel('Tempo [s]')

```

```

        ylabel('Tensão de cisalhamento na parede [N/m2]')
    case 14
        plot(vectime,mean(Cf(t1t:t2t,:),2));
        xlabel('Tempo [s]')
        ylabel('Coeficiente de Fricção')
    case 15
        plot(vectime,mean(Re(t1t:t2t,:),2));
        xlabel('Tempo [s]')
        ylabel('Número de Reynolds')
    case 16
        plot(vectime,mean(Nu(t1t:t2t,:),2));
        xlabel('Tempo [s]')
        ylabel('Número de Nusselt')
    case 17
        plot(time,matrixvel(:,pixel));
        xlabel('Tempo [s]')
        ylabel('Velocidade [m/s]')
    case 18
        plot(time,frp);
        hold on
        plot(time,frp1,'color','g');
        hold on
        plot(time,frp2,'color','r');
        xlabel('Tempo [s]')
        ylabel('Vazão [m3/s]')
        legend('Vazão Média','Vazão Plano 1','Vazão Plano 2')
    case 19
        plot (time,matrixconplan(:,pixel))
        hold on
        plot (time,matrixconplan1(:,pixel), 'color', 'g')
        hold on
        plot (time,matrixconplan2(:,pixel),'color', 'r')
        xlabel('Tempo [s]')
        ylabel('Concentração')
        legend('Concentração Média','Concentração Plano 1','Concentração
Plano 2')
    case 20
        plot (time,mean(tauw(:,poswp),2));
        xlabel('Tempo [s]')
        ylabel('Tensão de cisalhamento na parede [N/m2]')
    case 21
        plot (time,mean(Cf(:,poswp),2));
        xlabel('Tempo [s]')
        ylabel('Coeficiente de Fricção')
    case 22
        plot (time,mean(Re(:,pixel),2));
        xlabel('Tempo [s]')
        ylabel('Número de Reynolds')
    case 23
        plot (time,mean(Nu(:,poswp),2));
        xlabel('Tempo [s]')
        ylabel('Número de Nusselt')

end

% --- Execução de quando o botão '3D-concentração' é pressionado
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)

%Dado de entrada
R=str2num(get(handles.R,'String'));

```

```

%função para a animação 3D da concentração
if (get(handles.Annular, 'Value')== (get(handles.Annular, 'Max')))
    [pos3d, normcon]=plot3dconmeanannular(R);
elseif (get(handles.Stratified, 'Value')== (get(handles.Stratified, 'Max')))
    [pos3d, normcon]=plot3dconmean(R);
end

%Criação do gráfico 3D da concentração
figure ('name', '3D Plot of the Mean of Concentration')
vecpara=cell2mat(normcon(3));
xyz=[0 0 0];
th = linspace(0, 2*pi, 100);
circ = bsxfun(@plus, xyz', 100*R*[cos(th); sin(th); 0*th]);
h = plot3(circ(1, :), circ(2, :), circ(3, :));
RotationAxis = cross(xyz, vecpara);
if any(RotationAxis);
    RotationAngle = 180/pi*acos([0 0 1]*vecpara'/norm(vecpara));
    rotate(h, RotationAxis, RotationAngle, xyz);
end;
hold on;
%Gradiente de cores da concentração
for p=1:812
    quiver=[pos3d(p) normcon(p)];
    qq=cell2mat(quiver);
    if qq(6)<=4
        color='b';
    end
    if qq(6)>4 && qq(6)<=6
        color='g';
    end
    if qq(6)>6 && qq(6)<9
        color='y';
    end
    if qq(6)>=9
        color='r';
    end
    quiver3(qq(1), qq(2), qq(3), qq(4), qq(5), qq(6), color)
end

axis equal

% --- Execução de quando o botão '3D-Velocidade' é pressionado
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)

%Dado de entrada
R=str2num(get(handles.R, 'String'));
StandDev=str2num(get(handles.StandDev, 'String'));

%função para estimar posição dos pixels e quantificação das velocidades
if (get(handles.Annular, 'Value')== (get(handles.Annular, 'Max')))
    [pos3d, normvec]=plot3dvelmeanannular(R, StandDev);
elseif (get(handles.Stratified, 'Value')== (get(handles.Stratified, 'Max')))
    [pos3d, normvec]=plot3dvelmean(R, StandDev);
end

%Criação do gráfico 3D da Velocidade
figure ('name', '3D Plot of the Mean of Velocity')
vecpara=cell2mat(normvec(3));
xyz=[0 0 0];
th = linspace(0, 2*pi, 100);

```

```

circ = bsxfun(@plus,xyz',R*[cos(th); sin(th); 0*th]);
h = plot3(circ(1,:),circ(2,:),circ(3,:));
RotationAxis = cross(xyz,vecpara);
if any(RotationAxis);
    RotationAngle = 180/pi*acos([0 0 1]*vecpara'/norm(vecpara));
rotate(h,RotationAxis,RotationAngle,xyz);
end
hold on;
%Gradiente de cores da concentração
for p=1:812
    quiver=[pos3d(p) normvec(p)];
    qq=cell2mat(quiver);
    if qq(6)<=0.07
        color='b';
    end
    if qq(6)>0.06 && qq(6)<=0.09
        color='g';
    end
    if qq(6)>0.09 && qq(6)<0.12
        color='y';
    end
    if qq(6)>=0.12
        color='r';
    end
    quiver3(qq(1),qq(2),qq(3), qq(4), qq(5),qq(6),color)
end
axis equal

% --- Execução de quando o é selecionado algum item na seção 'Durante os
% tempos t1 e t2'
function popupmenu5_Callback(hObject, eventdata, handles)

%Dado de entrada
density=str2num(get(handles.density,'String'));
R=str2num(get(handles.R,'String'));
t1=str2num(get(handles.t1,'String'));
t2=str2num(get(handles.t2,'String'));
StandDev=str2num(get(handles.StandDev,'String'));
kinvisc=str2num(get(handles.kinvisc,'String'));
Pr=str2num(get(handles.Pr,'String'));
pixel=str2num(get(handles.pixel,'String'));

%Função para o cálculo durante os tempos t1 e t2
if (get(handles.Annular,'Value')==get(handles.Annular,'Max'))

[avegcontime1,avegcontime2,avegcontime,avegveltime,avegvolfowratetime,volu
metime,masstime]=timeresultsannular(density,R,t1,t2,StandDev,kinvisc,Pr);
elseif (get(handles.Stratified,'Value')==get(handles.Stratified,'Max'))

[avegcontime1,avegcontime2,avegcontime,avegveltime,avegvolfowratetime,volu
metime,masstime,tautime,Cftime,Retime,Nutime]=timeresults(density,pixel,R,t
1,t2,StandDev,kinvisc,Pr);
end

%Demonstração dos dados de saída
popup_sel_index = get(handles.popupmenu5, 'Value');
switch popup_sel_index
    case 1
        set(handles.duringtlandt2,'String',avegcontime1);
    case 2
        set(handles.duringtlandt2,'String',avegcontime2);

```

```

    case 3
        set(handles.duringtlandt2, 'String', avegcontime);
    case 4
        set(handles.duringtlandt2, 'String', avegvetime);
    case 5
        set(handles.duringtlandt2, 'String', avegvolfowratetime);
    case 6
        set(handles.duringtlandt2, 'String', volumetime);
    case 7
        set(handles.duringtlandt2, 'String', masstime);
    case 8
        set(handles.duringtlandt2, 'String', tautime);
    case 9
        set(handles.duringtlandt2, 'String', Cftime);
    case 10
        set(handles.duringtlandt2, 'String', Retime);
    case 11
        set(handles.duringtlandt2, 'String', Nutime);
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function popupmenu5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

% --- Execução de quando o é selecionado algum item na seção 'No pixel'
function popupmenu7_Callback(hObject, eventdata, handles)

%Dado de entrada
density=str2num(get(handles.density, 'String'));
R=str2num(get(handles.R, 'String'));
t1=str2num(get(handles.t1, 'String'));
t2=str2num(get(handles.t2, 'String'));
StandDev=str2num(get(handles.StandDev, 'String'));
kinvisc=str2num(get(handles.kinvisc, 'String'));
Pr=str2num(get(handles.Pr, 'String'));
pixel=str2num(get(handles.pixel, 'String'));

%Função para o cálculo no pixel
if (get(handles.Annular, 'Value')== (get(handles.Annular, 'Max')))

[avegconpix1, avegconpix2, avegconpix, avegvelpix, avegvolfowratepix, volumepix,
masspix]=pixresultsannular(density, pixel, R, t1, t2, StandDev, kinvisc, Pr);

elseif (get(handles.Stratified, 'Value')== (get(handles.Stratified, 'Max')))

[avegconpix1, avegconpix2, avegconpix, avegvelpix, avegvolfowratepix, volumepix,
masspix, kpix, Sijpix, epspix, Ppix, netapix, tpix, taupix, Cfpix, Repix, Nupix]=pix
results(density, pixel, R, t1, t2, StandDev, kinvisc, Pr);
end

%Demonstração dos dados de saída
popup_sel_index = get(handles.popupmenu7, 'Value');
switch popup_sel_index
    case 1
        set(handles.inthepixel, 'String', avegconpix1);
    case 2

```

```

        set(handles.inthepixel, 'String', avegconpix2);
    case 3
        set(handles.inthepixel, 'String', avegconpix);
    case 4
        set(handles.inthepixel, 'String', avegvelpix);
    case 5
        set(handles.inthepixel, 'String', avegvolfowratepix);
    case 6
        set(handles.inthepixel, 'String', volumepix);
    case 7
        set(handles.inthepixel, 'String', masspix);
    case 8
        set(handles.inthepixel, 'String', kpix);
    case 9
        set(handles.inthepixel, 'String', Sijpix);
    case 10
        set(handles.inthepixel, 'String', epspix);
    case 11
        set(handles.inthepixel, 'String', Ppix);
    case 12
        set(handles.inthepixel, 'String', netapix);
    case 13
        set(handles.inthepixel, 'String', tpix);
    case 14
        set(handles.inthepixel, 'String', taupix);
    case 15
        set(handles.inthepixel, 'String', Cfpix);
    case 16
        set(handles.inthepixel, 'String', Repix);
    case 17
        set(handles.inthepixel, 'String', Nupix);
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function popupmenu7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

% --- Execução de quando o é selecionado algum item na seção 'no pixel
durante os
% tempos t1 e t2'
function popupmenu8_Callback(hObject, eventdata, handles)

%Dado de entrada
density=str2num(get(handles.density, 'String'));
R=str2num(get(handles.R, 'String'));
t1=str2num(get(handles.t1, 'String'));
t2=str2num(get(handles.t2, 'String'));
StandDev=str2num(get(handles.StandDev, 'String'));
kinvisc=str2num(get(handles.kinvisc, 'String'));
Pr=str2num(get(handles.Pr, 'String'));
pixel=str2num(get(handles.pixel, 'String'));

%Função para o cálculo no pixel durante os tempos t1 e t2
if (get(handles.Annular, 'Value')== (get(handles.Annular, 'Max')))
    [avegconpixtime1, avegconpixtime2, avegconpixtime, ...
avegvelpixtime, avegvolfowratepixtime, volumepixtime, masspixtime]=pixtimeres
ultsannular(density, pixel, R, t1, t2, StandDev, kinvisc, Pr);

```

```

elseif (get(handles.Stratified, 'Value')== (get(handles.Stratified, 'Max')))
    [avegconpixtime1,avegconpixtime2,avegconpixtime,...

avegvelpixtime,avegvolfowratepixtime,volumepixtime,maspixtime,taupixtime,
Cfpixtime,Repixtime,Nupixtime]=pixtimeresults(density,pixel,R,t1,t2,StandDe
v,kinvisc,Pr)
end

%Demonstração dos dados de saída
popup_sel_index = get(handles.popupmenu8, 'Value');
switch popup_sel_index
    case 1
        set(handles.Inthepixdurtlnt2, 'String',avegconpixtime1);
    case 2
        set(handles.Inthepixdurtlnt2, 'String',avegconpixtime2);
    case 3
        set(handles.Inthepixdurtlnt2, 'String',avegconpixtime);
    case 4
        set(handles.Inthepixdurtlnt2, 'String',avegvelpixtime);
    case 5
        set(handles.Inthepixdurtlnt2, 'String',avegvolfowratepixtime);
    case 6
        set(handles.Inthepixdurtlnt2, 'String',volumepixtime);
    case 7
        set(handles.Inthepixdurtlnt2, 'String',maspixtime);
    case 8
        set(handles.Inthepixdurtlnt2, 'String',taupixtime);
    case 9
        set(handles.Inthepixdurtlnt2, 'String',Cfpixtime);
    case 10
        set(handles.Inthepixdurtlnt2, 'String',Repixtime);
    case 11
        set(handles.Inthepixdurtlnt2, 'String',Nupixtime);
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function popupmenu8_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

% --- Execução de quando o botão '3D - Concentração no tempo t1' é
pressionado
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)

%Dados de entrada
density=str2num(get(handles.density, 'String'));
R=str2num(get(handles.R, 'String'));
t1=str2num(get(handles.t1, 'String'));
t2=str2num(get(handles.t2, 'String'));
pixel=str2num(get(handles.pixel, 'String'));

%função que posiciona os pixel e quantifica as concentrações no tempo t1
StandDev=str2num(get(handles.StandDev, 'String'));
if (get(handles.Annular, 'Value')== (get(handles.Annular, 'Max')))
    [pos3d,normcon]=plot3dcontlannular(density,R,t1,t2,pixel,StandDev);
elseif (get(handles.Stratified, 'Value')== (get(handles.Stratified, 'Max')))
    [pos3d,normcon]=plot3dcontl(density,R,t1,t2,pixel,StandDev);

```

```

end

figure ('name','Plot 3D da concentração média')
vecpara=cell2mat(normcon(3));
xyz=[0 0 0];
th = linspace(0,2*pi,100);
circ = bsxfun(@plus,xyz',R*100*[cos(th); sin(th); 0*th]);
h = plot3(circ(1,:),circ(2,:),circ(3,:));
RotationAxis = cross(xyz,vecpara);
if any(RotationAxis);
    RotationAngle = 180/pi*acos([0 0 1]*vecpara'/norm(vecpara));
rotate(h,RotationAxis,RotationAngle,xyz);
end;
hold on;
for p=1:812
    quiver=[pos3d(p) normcon(p)];
    qq=cell2mat(quiver);
    if qq(6)<=4
        color='b';
    end
    if qq(6)>4 && qq(6)<=6
        color='g';
    end
    if qq(6)>6 && qq(6)<9
        color='y';
    end
    if qq(6)>=9
        color='r';
    end
    quiver3(qq(1),qq(2),qq(3), qq(4), qq(5),qq(6),color)
end
axis equal

% --- Execução de quando o botão 'Animação 3D da concentração durante os
tempos t1 e t2' é pressionado
function pushbutton6_Callback(hObject, eventdata, handles)

%Dados de entrada
density=str2num(get(handles.density,'String'));
R=str2num(get(handles.R,'String'));
t1=str2num(get(handles.t1,'String'));
t2=str2num(get(handles.t2,'String'));
pixel=str2num(get(handles.pixel,'String'));
StandDev=str2num(get(handles.StandDev,'String'));

%Função de criação de dados para a animação
if (get(handles.Annular,'Value')==get(handles.Annular,'Max'))
    [time,pos3d,normcon,anim]=animationannular(R,t1,t2);
elseif (get(handles.Stratified,'Value')==get(handles.Stratified,'Max'))
    [time,pos3d,normcon,anim]=animation(R,t1,t2);
end

%Criação dos gráficos 3D

rmdir('frames','s');
mkdir('frames');
t1t=find(time==t1);
t2t=find(time==t2);

for t=t1t:3:t2t

```

```

fig2=figure ('name','Animação 3D da concentração entre os tempos t1
e t2')
vecpara=cell2mat(normcon(3));
xyz=[0 0 0];
th = linspace(0,2*pi,100);
circ = bsxfun(@plus,xyz',100*R*[cos(th); sin(th); 0*th]);
h = plot3(circ(1,:),circ(2,:),circ(3,:));
RotationAxis = cross(xyz,vecpara);
if any(RotationAxis);
    RotationAngle = 180/pi*acos([0 0 1]*vecpara'/norm(vecpara));
    rotate(h,RotationAxis,RotationAngle,xyz);
end
hold on;

for p=1:812

    quiver=[pos3d(p) anim(t,p)];
    qq=cell2mat(quiver);

    if qq(6)<=4
        color='b';
    end
    if qq(6)>4 && qq(6)<=6
        color='g';
    end
    if qq(6)>6 && qq(6)<9
        color='y';
    end
    if qq(6)>=9
        color='r';
    end
    quiver3(qq(1),qq(2),qq(3), qq(4), qq(5),qq(6),color)
end
axis equal
saveas(gcf, fullfile('frames', strcat('img',num2str(t))), 'jpeg');
close (fig2);
end

%Criação d vídeo
workingDir='frames';
imageNames = dir(fullfile(workingDir,'*.jpg'));
imageNames = {imageNames.name}';
outputVideo = VideoWriter(fullfile('Animation3D_out.avi'));
open(outputVideo)
for ii = 1:length(imageNames)
    img = imread(fullfile(workingDir,imageNames{ii}));
    writeVideo(outputVideo,img)
end
close(outputVideo)
animationAvi = VideoReader(fullfile('Animation3D_out.avi'));
ii = 1;
f = figure;
f.Position = [150 150 animationAvi.Width animationAvi.Height];
ax = gca;
ax.Units = 'pixels';
ax.Position = [0 0 animationAvi.Width animationAvi.Height];

% --- Execução de quando o botão 'Animação 3D da velocidade no pixel' é
pressionado
function pushbutton8_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

%Dados de entrada
density=str2num(get(handles.density,'String'));
R=str2num(get(handles.R,'String'));
t1=str2num(get(handles.t1,'String'));
t2=str2num(get(handles.t2,'String'));
pixel=str2num(get(handles.pixel,'String'));
StandDev=str2num(get(handles.StandDev,'String'));

%Função que posiciona o pixel e sua velocidade
if (get(handles.Annular,'Value')==get(handles.Annular,'Max'))
    [time,pos3d,normcon,anim]=animationannularvelpix(R,t1,t2,pixel);
elseif (get(handles.Stratified,'Value')==get(handles.Stratified,'Max'))
    [time,pos3d,normcon,anim]=animationvelpix(R,t1,t2,pixel);
end

%Criação dos gráfico 3D
rmdir('frames','s');
mkdir('frames');

for t=1:7:358

    fig1=figure('name','Animação 3D da velocidade no pixel');
    vecpara=cell2mat(normcon(3));
    xyz=[0 0 0];
    th = linspace(0,2*pi,100);
    circ = bsxfun(@plus,xyz',10*R*[cos(th); sin(th); 0*th]);
    h = plot3(circ(1,:),circ(2,:),circ(3,:));
    RotationAxis = cross(xyz,vecpara);
    if any(RotationAxis);
        RotationAngle = 180/pi*acos([0 0 1]*vecpara'/norm(vecpara));
        rotate(h,RotationAxis,RotationAngle,xyz);
    end
    hold on
    quiver=[pos3d(pixel) anim(t)];
    qq=cell2mat(quiver);
    if qq(6)==0
        qq(6)=0.0001
    end
    if qq(6)<=0.07
        color='b';
    end
    if qq(6)>0.07 && qq(6)<=0.09
        color='g';
    end
    if qq(6)>0.09 && qq(6)<0.12
        color='y';
    end
    if qq(6)>=0.12
        color='r';
    end
    quiver3(qq(1),qq(2),qq(3), qq(4), qq(5),qq(6),color)
    axis equal
    saveas(gcf,fullfile('frames',strcat('imgpix',num2str(t))),'jpeg');
    close(fig1);
end

%Criação dos vídeos
workingDir='frames';
imageNames = dir(fullfile(workingDir,'*.jpg'));

```

```

imageNames = {imageNames.name}';
outputVideo = VideoWriter(fullfile('Animation3DPix_out.avi'));
open(outputVideo)
for ii = 1:length(imageNames)
    img = imread(fullfile(workingDir,imageNames{ii}));
    writeVideo(outputVideo,img)
end
close(outputVideo)
animationAvi = VideoReader(fullfile('Animation3DPix_out.avi'));

% -----
function wettedperpushtool1_ClickedCallback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to wettedperpushtool1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

function StandDev_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to StandDev (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of StandDev as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of StandDev as
a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function StandDev_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to StandDev (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in Annular.
function Annular_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Annular (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of Annular

% --- Executes on button press in Stratified.
function Stratified_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Stratified (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of Stratified

function kinvisc_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to kinvisc (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of kinvisc as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of kinvisc as a
double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function kinvisc_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to kinvisc (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function Pr_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to Pr (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of Pr as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of Pr as a
double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function Pr_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to Pr (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

mainresults.m

```

function [totalmeanconplan1,totalmeanconplan2,totalmeancon,totalmeanvel,...

avegflowrate,volume,mass,pixwallcon,pixwallcondurt1t2,kmed,epsmed,P,tauwmed
,Ret,Cfmed,Numed]=mainresults(density,R,t1,t2,pixel,StandDev,Pr,kinvisc)

% Limpando e Carregando Dados
positions = imread('position.bmp');
groups=loading();
cellsz = cellfun(@size,groups,'uni',false);
M = cell2mat(cellsz);
groupsz = M(2:2:end);

%Número de zonas
for i = 1:length (groups)
    zones(i) = (groupsz(i)-4)/3;
end

%Criando Matriz geral de Concentração nos planos 1 e 2
for i=1:length (groups)
    capgroupcon = groups(i);
    groupconint = cell2mat(capgroupcon);
    groupconint(:,((zones(i)*2)+4):end) = [];
    groupconint(:,1:3) = [];
    groupconplan1(i) = {groupconint(:,1:2:end)};
    groupconplan2(i) = {groupconint(:,2:2:end)};
    groupcon(i) = {groupconint};
end

%Criando Matriz geral de velocidade
for i = 1:length (groups)
    capgroupvel = groups(i);
    groupvelint = cell2mat(capgroupvel);
    groupvelint(:,1:((zones(i)*2)+4)) = [];
    groupvel(i) = {groupvelint};
end

%Convertendo cell em matrizes
matrixvel = cell2mat(groupvel);
matrixcon = cell2mat(groupcon);
matrixconplan1 = cell2mat(groupconplan1);
matrixconplan2 = cell2mat(groupconplan2);

%convertendo de cm/s para m/s
matrixvel=matrixvel*0.01;

%Vetor do Tempo
capttime = cell2mat(groups(1));
time = capttime(:,1);

%Número de pixels
numpixels = (1:size(matrixvel,2));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Tratamento Estatístico

% Pixels da parede e seus adjacentes

```

```

wp=[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 19 20 21 22 23 24 25 38 39 40 41 42 59 60 61
62 81 82 83 84 105 106 107 108 131 132 133 134 159 160 161 188 189 190 217
218 219 248 249 278 279 280 309 310 311 342 343 374 375 406 407 438 439 470
471 502 503 504 533 534 535 564 565 594 595 596 623 624 625 652 653 654 679
680 681 682 705 706 707 708 729 730 731 732 751 752 753 754 771 772 773 774
775 788 789 790 791 792 793 794 801 802 803 804 805 806 807 808 809 810 811
812];
dif=[13 13 14 15 16 17 18 18 26 27 28 29 34 35 36 37 43 44 45 56 57 58 63
64 79 80 85 86 103 104 109 110 129 130 135 136 157 158 162 163 186 187 191
216 220 221 246 247 250 277 281 308 312 312 313 340 341 341 344 373 373 376
406 408 437 440 469 472 472 473 500 501 504 532 536 563 566 567 592 593 596
622 626 627 650 651 655 656 677 678 683 684 703 704 709 710 727 728 733 734
749 750 755 756 757 768 769 770 776 777 778 779 784 785 786 787 795 795 796
797 798 799 800 800];

%Deletando todos os dados maiores ou menores que o
multiplicador*desviopadrão
avegvelpp = mean(matrixvel, 1);
standvelpp = std(avegvelpp);
totalmeanvel = mean(avegvelpp);

for i=1:length (numpixels)
    for j=1:length(time)
        if matrixvel(j,i)>totalmeanvel+StandDev*standvelpp
            matrixvel(j,i)=totalmeanvel+StandDev*standvelpp;
        elseif matrixvel(j,i)<totalmeanvel-StandDev*standvelpp
            if matrixvel(j,i)~=0
                matrixvel(j,i)=totalmeanvel-StandDev*standvelpp;
            end
        end
    end
end

%Média por pixel
avegvelpp = mean(matrixvel, 1);
avegconpp = mean(matrixcon, 1);
avegconplan1pp = mean(matrixconplan1, 1);
avegconplan2pp = mean(matrixconplan2, 1);

%Desvio padrão da velocidade e contração por pixel
standvelpp = std(avegvelpp);
standconpp = std(avegconpp);
standconplan1pp = std(avegconplan1pp);
standconplan2pp = std(avegconplan2pp);

%Média temporal
avegvelpt = mean(matrixvel, 2);
avegconpt = mean(matrixcon, 2);
avegconplan1pt = mean(matrixconplan1, 2);
avegconplan2pt = mean(matrixconplan2, 2);

%Desvio padrão temporal da velocidade e concentração
standvelpt = std(avegvelpt);
standconpt = std(avegconpt);
standconplan1pt = std(avegconplan1pt);
standconplan2pt = std(avegconplan2pt);

%Média total da velocidade e concentração
totalmeanvel = mean(avegvelpp);

```

```

totalmeancon = mean(avegconpp);
totalmeanconplan1 = mean(avegconplan1pp);
totalmeanconplan2 = mean(avegconplan2pp);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Área total da seção transversal do plano
totarea = pi*R^2;

%Área do pixel
pixarea = totarea/length(numpixels);

%Base
ba=pixarea^(1/2);
hg=pixarea^(1/2);
totalhg=hg*32;

%Vazão de cada pixel
matrixconplan=squeeze(mean(cat(3,matrixconplan1,matrixconplan2),3));
flowratepix1=matrixconplan1.*matrixvel*pixarea;
flowratepix2=matrixconplan2.*matrixvel*pixarea;
flowratepix=matrixconplan.*matrixvel*pixarea;
frp1=flowratepix1(:,pixel);
frp2=flowratepix2(:,pixel);
frp=flowratepix(:,pixel);

%Vazão média de cada pixel
avegflowrate=mean(mean(flowratepix));

%Volume total
Volumeperpixel=flowratepix*time(2); %Volume por pixel por time
volumepertime=sum(Volumeperpixel,2); %Volme por time
volume=sum(volumepertime); %Volume Total
totalflowrate = sum(flowratepix,2); %Vazão por tempo

%Massa
mass=volume*density;

%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Turbulência

%Calcular o gradiente de velocidade na parede
gradvel=(matrixvel(:,wp)-matrixvel(:,dif))/ba;
matconwall=matrixconplan1(:,wp);
gradvel(matconwall<=0)=0;

%Energia Cinética turbulenta
stdmatrixvel=std(matrixvel);
k=stdmatrixvel*3/2;
kmed=mean(k);

% Gradiente do Desvio Padrão
gradstd=(stdmatrixvel(wp)-stdmatrixvel(dif))/ba;

%Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta
Sij=gradstd./2;
eps=2*kinvisc*Sij.^2;
epsmed=sum(eps);

```

```

%Viscosidade turbulenta - Modelo k-epsilon
C=0.09;
vt=C*kmed.^2/epsmed;

%Produção da energia cinética turbulenta
P=vt*gradvel.^2;
P=mean(P);
P=mean(P);

%Escalas de Kolmogorov
neta=((kinvisc^3)./eps).^(1/4);
t=(kinvisc./eps).^(1/2);

%Tensão Cisalhante na parede do tubo
tauw=density*kinvisc*gradvel;
tauwmed=mean(mean(tauw));

%Coeficiente de Fricção
velwp=matrixvel(:,wp);
Cf=tauw./(0.5*density*velwp.^2);
Cf(velwp<=0)=0;
Cfmed=mean(mean(Cf));

%Reynolds
Re=matrixvel*ba/kinvisc;
Ret=totalmeanvel*2*R/kinvisc;
Rew = velwp*ba/kinvisc;

%Nusselt
%Nu=Cf.*Rew*Pr^(1/3)/2;
%Numed=mean(mean(Nu));
Numed=0.023*Ret^(4/5)*Pr^(1/3);
%
%Preparando dados para a saída da função

t1t=find(time==t1);
t2t=find(time==t2);
vectime=time(t1t:t2t);

%Durante os tempos t1 e t2
avegcontime1=mean(avegconplan1pt(t1t:t2t)); %Concentração
Média no plano 1 em um tempo conhecido
avegcontime2=mean(avegconplan2pt(t1t:t2t)); %Concentração
Média no plano 2 em um tempo conhecido
avegcontime=mean(avegconpt(t1t:t2t)); %Concentração
Média em um tempo conhecido
avegveltime=mean(avegvelpt(t1t:t2t)); %Velocidade
Média em um tempo conhecido
avegvolflowratetime=mean(totalflowrate(t1t:t2t)); %Vazão Média em
um tempo conhecido
volumetime=sum(volumepertime(t1t:t2t)); %Volume total
em um tempo conhecido
masstime=volumetime*density; %Massa total em
um tempo conhecido

%Perímetro Molhado
pixwallcon=mean(avegconplan1pp(wp)+avegconplan2pp(wp))/2;
pixwallcondurt1t2=mean(mean(matrixconplan1(t1t:t2t,wp),1)+mean(matrixconpla
n2(t1t:t2t,wp),1))/2;
end

```

plotgraphs.m

```
function
```

```
[cenvel, vertpix, time, avegvelpt, matrixvel, totalflowrate, frp, frp1, frp2, ...
```

```
avegconpt, avegconplan1pt, avegconplan2pt, matrixconplan, matrixconplan1, matrixconplan2, poswp, vectime, tauw, Cf, Re, Nu, t1t, t2t]=plotgraphs(density, R, t1, t2, pixel, StandDev, Pr, kinvisc)
```

```
groups=loading();
cellsz = cellfun(@size, groups, 'uni', false);
M = cell2mat(cellsz);
groupsz = M(2:2:end);
```

```
%Number of zones
```

```
for i = 1:length (groups)
    zones(i) = (groupsz(i)-4)/3;
end
```

```
%Concentration
```

```
for i=1:length (groups)
    capgroupcon = groups(i);
    groupconint = cell2mat(capgroupcon);
    groupconint(:, ((zones(i)*2)+4):end) = [];
    groupconint(:, 1:3) = [];
    groupconplan1(i) = {groupconint(:, 1:2:end)};
    groupconplan2(i) = {groupconint(:, 2:2:end)};
    groupcon(i) = {groupconint};
end
```

```
%Velocity
```

```
for i = 1:length (groups)
    capgroupvel = groups(i);
    groupvelint = cell2mat(capgroupvel);
    groupvelint(:, 1:((zones(i)*2)+4)) = [];
    groupvel(i) = {groupvelint};
end
```

```
%Converting cell into matrices
```

```
matrixvel = cell2mat(groupvel);
matrixcon = cell2mat(groupcon);
matrixconplan1 = cell2mat(groupconplan1);
matrixconplan2 = cell2mat(groupconplan2);
```

```
%convertendo de cm/s para m/s
matrixvel=matrixvel*0.01;
```

```
%Time
```

```
capttime = cell2mat(groups(1));
time = capttime(:, 1);
```

```
%Number of pixels
```

```
numpixels = (1:size(matrixvel, 2));
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Statistics

% Considering the velocities on wall are zero

wp=[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 19 20 21 22 23 24 25 38 39 40 41 42 59 60 61
62 81 82 83 84 105 106 107 108 131 132 133 134 159 160 161 188 189 190 217
218 219 248 249 278 279 280 309 310 311 342 343 374 375 406 407 438 439 470
471 502 503 504 533 534 535 564 565 594 595 596 623 624 625 652 653 654 679
680 681 682 705 706 707 708 729 730 731 732 751 752 753 754 771 772 773 774
775 788 789 790 791 792 793 794 801 802 803 804 805 806 807 808 809 810 811
812];
dif=[13 13 14 15 16 17 18 18 26 27 28 29 34 35 36 37 43 44 45 56 57 58 63
64 79 80 85 86 103 104 109 110 129 130 135 136 157 158 162 163 186 187 191
216 220 221 246 247 250 277 281 308 312 312 313 340 341 341 344 373 373 376
406 408 437 440 469 472 472 473 500 501 504 532 536 563 566 567 592 593 596
622 626 627 650 651 655 656 677 678 683 684 703 704 709 710 727 728 733 734
749 750 755 756 757 768 769 770 776 777 778 779 784 785 786 787 795 795 796
797 798 799 800 800];

%Deleting all the data more or less than the standard deviation

avegvelpp = mean(matrixvel, 1);
standvelpp = std(avegvelpp);
totalmeanvel = mean(avegvelpp);

for i=1:length (numpixels)
    for j=1:length(time)
        if matrixvel(j,i)>totalmeanvel+StandDev*standvelpp
            matrixvel(j,i)=totalmeanvel+StandDev*standvelpp;
        elseif matrixvel(j,i)<totalmeanvel-StandDev*standvelpp
            if matrixvel(j,i)~=0
                matrixvel(j,i)=totalmeanvel-StandDev*standvelpp;
            end
        end
    end
end

%Average per pixel
avegvelpp = mean(matrixvel, 1);
avegconpp = mean(matrixcon, 1);
avegconplan1pp = mean(matrixconplan1, 1);
avegconplan2pp = mean(matrixconplan2, 1);

%Standard Deviation of velocity and concentration per pixel
standvelpp = std(avegvelpp);
standconpp = std(avegconpp);
standconplan1pp = std(avegconplan1pp);
standconplan2pp = std(avegconplan2pp);

%Average per time
avegvelpt = mean(matrixvel, 2);
avegconpt = mean(matrixcon, 2);
avegconplan1pt = mean(matrixconplan1, 2);
avegconplan2pt = mean(matrixconplan2, 2);

```

```

%Standard Deviation of velocity and concentration per time
standvelpt = std(avegvelpt);
standconpt = std(avegconpt);
standconplan1pt = std(avegconplan1pt);
standconplan2pt = std(avegconplan2pt);

%Total Average of Velocities and concentration
totalmeanvel = mean(avegvelpp);
totalmeancon = mean(avegconpp);
totalmeanconplan1 = mean(avegconplan1pp);
totalmeanconplan2 = mean(avegconplan2pp);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Total plane area
totarea = pi*R^2;
%Area of pixel
pixarea = totarea/length(numpixels);
%base
ba=pixarea^(1/2);
hg=pixarea^(1/2);
totalhg=hg*32;

%Flowrate of each pixel
matrixconplan=squeeze(mean(cat(3,matrixconplan1,matrixconplan2),3));
flowratepix1=matrixconplan1.*matrixvel*pixarea;
flowratepix2=matrixconplan2.*matrixvel*pixarea;
flowratepix=matrixconplan.*matrixvel*pixarea;
frp1=flowratepix1(:,pixel);
frp2=flowratepix2(:,pixel);
frp=flowratepix(:,pixel);
%Total Volume

Volumeperpixel=flowratepix*time(2); %Volume per pixel per time
volumepertime=sum(Volumeperpixel,2); %Volme per time
volume=sum(volumepertime); %Total Volume
totalflowrate = sum(flowratepix,2); %Flowrate per time

%Mass

mass=volume*density;

%Average in a known period

t1t=find(time==t1);
t2t=find(time==t2);
poswp=find(wp==pixel);
vectime=time(t1t:t2t);

%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Turbulence

%Calculate the velocity gradient
gradvel=(matrixvel(:,wp)-matrixvel(:,dif))/ba;
matconwall=matrixconplan1(:,wp);
gradvel(matconwall<=0)=0;

%Calculate the Turbulence Kinectic Energy of each pixel
stdmatrixvel=std(matrixvel);

```

```

k=stdmatrixvel*3/2;
kmed=mean(k);

% Standart Deviation Gradient

gradstd=(stdmatrixvel(wp)-stdmatrixvel(dif))/ba;

%Rate of dissipation of turbulent kinetic energy

Sij=gradstd./2;
eps=2*kinvisc*Sij.^2;
epsmed=mean(eps);

%Turbulent Viscosity
C=0.09;
vt=C*kmed.^2/epsmed;

%Production
P=vt*gradvel.^2;
P=sum(P);
Pmed=mean(P);

%Kolmogorov
neta=((kinvisc^3)./eps).^(1/4);
t=(kinvisc./eps).^(1/2);

%Shear Tension
tauw=density*kinvisc*gradvel;
tauwmed=mean(mean(tauw));

%Friccion Coef
velwp=matrixvel(:,wp);
Cf=tauw./(0.5*density*velwp.^2);
Cf(velwp<=0)=0;
Cfmed=mean(mean(Cf));

%Reynolds

Re=matrixvel*ba/kinvisc;
Ret=totalmeanvel*2*R/kinvisc;
Rew = velwp*ba/kinvisc;

%Nusselt

Nu=Cf.*Rew*Pr^(1/3)/2;
Numed=mean(mean(Nu));

%


---


%Pixels in the center of the tube

cenvel={avegvelpp(5) avegvelpp(16) avegvelpp(32) avegvelpp(51)
avegvelpp(72) avegvelpp(95) avegvelpp(120) avegvelpp(147) avegvelpp(175)
avegvelpp(204) avegvelpp(234) avegvelpp(264)...
avegvelpp(295) avegvelpp(327) avegvelpp(359) avegvelpp(391)
avegvelpp(423) avegvelpp(455) avegvelpp(487) avegvelpp(519) avegvelpp(550)
avegvelpp(580) avegvelpp(610)...

```

```
    avegvelpp(639) avegvelpp(667) avegvelpp(694) avegvelpp(720)
avegvelpp(742) avegvelpp(763) avegvelpp(782) avegvelpp(798)
avegvelpp(809) };
vertpix=1:length(cenvel);
cenvel=cell2mat(cenvel);

%Data for 3D Plot of Velocity

diam=R*2;
pos3d=position3d(diam);
end
```

plot3dconmean.m

```

function [pos3d,normcon]=plot3dconmean(R)

groups=loading();

cellsz = cellfun(@size,groups,'uni',false);
M = cell2mat(cellsz);
groupsz = M(2:2:end);

%Number of zones

for i = 1:length (groups)
    zones(i) = (groupsz(i)-4)/3;
end

%Concentration

for i=1:length (groups)
    capgroupcon = groups(i);
    groupconint = cell2mat(capgroupcon);
    groupconint(:,((zones(i)*2)+4):end) = [];
    groupconint(:,1:3) = [];
    groupconplan1(i) = {groupconint(:,1:2:end)};
    groupconplan2(i) = {groupconint(:,2:2:end)};
    groupcon(i) = {groupconint};
end

%Converting cell into matrices
matrixcon = cell2mat(groupcon);
matrixconplan1 = cell2mat(groupconplan1);
matrixconplan2 = cell2mat(groupconplan2);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Statistics

%Average per pixel
avegconpp = mean(matrixcon, 1);
avegconplan1pp = mean(matrixconplan1, 1);
avegconplan2pp = mean(matrixconplan2, 1);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Output
diam=R*2*100;
areapixel=diam/32;
pos3d=position3d(diam);

%Adding the x and y coordinates of the vectors of Concentration
for i=1:812
    normcon(i)={ [0 0 10*avegconplan1pp(i)] };
end
end

```

```
plot3dvelmean.m
```

```
function [pos3d,normvec]=plot3dvelmean(R,StandDev)
```

```
groups=loading();
```

```
cellsz = cellfun(@size,groups,'uni',false);
```

```
M = cell2mat(cellsz);
```

```
groupsz = M(2:2:end);
```

```
%Number of zones
```

```
for i = 1:length (groups)
    zones(i) = (groupsz(i)-4)/3;
```

```
end
```

```
%Velocity
```

```
for i = 1:length (groups)
    capgroupvel = groups(i);
    groupvelint = cell2mat(capgroupvel);
    groupvelint(:,1:(zones(i)*2)+4) = [];
    groupvel(i) = {groupvelint};
```

```
end
```

```
%Converting cell into matrices
```

```
matrixvel = cell2mat(groupvel);
```

```
%convertendo de cm/s para m/s
```

```
matrixvel=matrixvel*0.01;
```

```
%Time
```

```
capttime = cell2mat(groups(1));
```

```
time = capttime(:,1);
```

```
%Number of pixels
```

```
numpixels = (1:size(matrixvel,2));
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%Statistics
```

```
% Considering the velocities on wall are zero
```

```
wp=[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 19 20 21 22 23 24 25 38 39 40 41 42 59 60 61
62 81 82 83 84 105 106 107 108 131 132 133 134 159 160 161 188 189 190 217
218 219 248 249 278 279 280 309 310 311 342 343 374 375 406 407 438 439 470
471 502 503 504 533 534 535 564 565 594 595 596 623 624 625 652 653 654 679
680 681 682 705 706 707 708 729 730 731 732 751 752 753 754 771 772 773 774
775 788 789 790 791 792 793 794 801 802 803 804 805 806 807 808 809 810 811
812];
```

```
%Deleting all the data more or less than the standard deviation
```

```
avegvelpp = mean(matrixvel, 1);
```

```

standvelpp = std(avegvelpp);
totalmeanvel = mean(avegvelpp);

for i=1:length (numpixels)
    for j=1:length(time)
        if matrixvel(j,i)>totalmeanvel+StandDev*standvelpp
            matrixvel(j,i)=totalmeanvel+StandDev*standvelpp;
        elseif matrixvel(j,i)<totalmeanvel-StandDev*standvelpp
            if matrixvel(j,i)~=0
                matrixvel(j,i)=totalmeanvel-StandDev*standvelpp;
            end
        end
    end
end

end

end

%Average per pixel
avegvelpp = mean(matrixvel, 1);

%Standard Deviation of velocity per pixel
standvelpp = std(avegvelpp);

%Total Average of Velocities
totalmeanvel = mean(avegvelpp);

%Data for 3D Plot of Velocity

diam=R*2;
pos3d=position3d(diam);

%Adding the x and y coordinates of the vectors of Velocity
for i=1:812
    normvec(i)={[0 0 avegvelpp(i)]};
end

end

```

timeresults.m

```

function [avegcontime1,avegcontime2,avegcontime,avegvetime,...
avegvolfowratetime,volumetime,masstime,tautime,Cftime,Retime,Nutime]=timer
esults(density,pixel,R,t1,t2,StandDev,kinvisc,Pr)
% Cleaning and Loading

groups=loading();

cellsz = cellfun(@size,groups,'uni',false);
M = cell2mat(cellsz);
groupsz = M(2:2:end);

%Number of zones

for i = 1:length (groups)
    zones(i) = (groupsz(i)-4)/3;
end

%Concentration

for i=1:length (groups)
    capgroupcon = groups(i);
    groupconint = cell2mat(capgroupcon);
    groupconint(:,((zones(i)*2)+4):end) = [];
    groupconint(:,1:3) = [];
    groupconplan1(i) = {groupconint(:,1:2:end)};
    groupconplan2(i) = {groupconint(:,2:2:end)};
    groupcon(i) = {groupconint};
end

%Velocity

for i = 1:length (groups)
    capgroupvel = groups(i);
    groupvelint = cell2mat(capgroupvel);
    groupvelint(:,1:((zones(i)*2)+4)) = [];
    groupvel(i) = {groupvelint};
end

%Converting cell into matrices

matrixvel = cell2mat(groupvel);
matrixcon = cell2mat(groupcon);
matrixconplan1 = cell2mat(groupconplan1);
matrixconplan2 = cell2mat(groupconplan2);

%convertendo de cm/s para m/s
matrixvel=matrixvel*0.01;

%Time

captime = cell2mat(groups(1));
time = captime(:,1);

%Number of pixels

```

```

numpixels = (1:size(matrixvel,2));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Statistics

% Pixels on the wall
wp=[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 19 20 21 22 23 24 25 38 39 40 41 42 59 60 61
62 81 82 83 84 105 106 107 108 131 132 133 134 159 160 161 188 189 190 217
218 219 248 249 278 279 280 309 310 311 342 343 374 375 406 407 438 439 470
471 502 503 504 533 534 535 564 565 594 595 596 623 624 625 652 653 654 679
680 681 682 705 706 707 708 729 730 731 732 751 752 753 754 771 772 773 774
775 788 789 790 791 792 793 794 801 802 803 804 805 806 807 808 809 810 811
812];
dif=[13 13 14 15 16 17 18 18 26 27 28 29 34 35 36 37 43 44 45 56 57 58 63
64 79 80 85 86 103 104 109 110 129 130 135 136 157 158 162 163 186 187 191
216 220 221 246 247 250 277 281 308 312 312 313 340 341 341 344 373 373 376
406 408 437 440 469 472 472 473 500 501 504 532 536 563 566 567 592 593 596
622 626 627 650 651 655 656 677 678 683 684 703 704 709 710 727 728 733 734
749 750 755 756 757 768 769 770 776 777 778 779 784 785 786 787 795 795 796
797 798 799 800 800];

%Deleting all the data more or less than the standard deviation

avegvelpp = mean(matrixvel, 1);
standvelpp = std(avegvelpp);
totalmeanvel = mean(avegvelpp);

for i=1:length (numpixels)
    for j=1:length(time)
        if matrixvel(j,i)>totalmeanvel+StandDev*standvelpp
            matrixvel(j,i)=totalmeanvel+StandDev*standvelpp;
        elseif matrixvel(j,i)<totalmeanvel-StandDev*standvelpp
            if matrixvel(j,i)~=0
                matrixvel(j,i)=totalmeanvel-StandDev*standvelpp;
            end
        end
    end
end

%Average per time
avegvelpt = mean(matrixvel, 2);
avegconpt = mean(matrixcon, 2);
avegconplan1pt = mean(matrixconplan1, 2);
avegconplan2pt = mean(matrixconplan2, 2);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Total plane area
totarea = pi*R^2;
%Area of pixel
pixarea = totarea/length(numpixels);
%base
ba=pixarea^(1/2);
hg=pixarea^(1/2);
totalhg=hg*32;
%
%Flowrate of each pixel

```

```

matrixconplan=squeeze(mean(cat(3,matrixconplan1,matrixconplan2),3));
flowratepix1=matrixconplan1.*matrixvel*pixarea;
flowratepix2=matrixconplan2.*matrixvel*pixarea;
flowratepix=matrixconplan.*matrixvel*pixarea;
frp1=flowratepix1(:,pixel);
frp2=flowratepix2(:,pixel);
frp=flowratepix(:,pixel);

%Calculate the mean of flowrate

avegflowrate=mean(mean(flowratepix));

%Total Volume

Volumeperpixel=flowratepix*time(2); %Volume per pixel per time
volumepertime=sum(Volumeperpixel,2); %Volme per time
volume=sum(volumepertime); %Total Volume
totalflowrate = sum(flowratepix,2); %Flowrate per time

%Mass

mass=volume*density;
%
%Turbulence
%Calculate the velocity gradient
gradvel=(matrixvel(:,wp)-matrixvel(:,dif))/ba;
matconwall=matrixconplan1(:,wp);
gradvel(matconwall<=0)=0;

%Calculate the Turbulence Kinectic Energy of each pixel
stdmatrixvel=std(matrixvel);
k=stdmatrixvel*3/2;
kmed=mean(k);

% Standart Deviation Gradient

gradstd=(stdmatrixvel(wp)-stdmatrixvel(dif))/ba;

%Rate of dissipation of turbulent kinetic energy

Sij=gradstd./2;
eps=2*kinvisc*Sij.^2;
epsmed=sum(eps);

%Turbulent Viscosity
C=0.09;
vt=C*kmed.^2/epsmed;

%Production
P=vt*gradvel.^2;
Pmed=mean(P);
P=sum(Pmed);

%Kolmogorov
neta=((kinvisc^3)./eps).^1/4;
t=(kinvisc./eps).^1/2;

```

```

%Shear Tension
tauw=density*kinvisc*gradvel;
tauwmed=mean(mean(tauw));

%Friccion Coef
velwp=matrixvel(:,wp);
Cf=tauw./(0.5*density*velwp.^2);
Cf(velwp<=0)=0;
Cfmed=mean(mean(Cf));

%Reynolds

Re=matrixvel*ba/kinvisc;
Ret=totalmeanvel*2*R/kinvisc;
Rew = velwp*ba/kinvisc;

%Nusselt

% Nu=Cf.*Rew*Pr^(1/3)/2;
% Numed=mean(mean(Nu));
Numed2=0.023*Ret^(4/5)*Pr^(1/3);

%

```

```

%Average in a known period

t1t=find(time==t1);
t2t=find(time==t2);
%During time 1 and 2
avegcontime1=mean(avegconplan1pt(t1t:t2t)); %Calculate the
total aveg concentration of plan 1 in a known period
avegcontime2=mean(avegconplan2pt(t1t:t2t)); %Calculate the
total aveg concentration of plan 2 in a known period
avegcontime=mean(avegconpt(t1t:t2t)); %Calculate the
total aveg concentration in a known period
avegveltime=mean(avegvelpt(t1t:t2t)); %Calculate the
total aveg velocity in a known period
avegvolflowratetime=mean(totalflowrate(t1t:t2t)); %Calculate the
total aveg of volumetric flowrate in a known period
volumetime=sum(volumepertime(t1t:t2t)); %Calculate the
total volume in a known period
masstime=volumetime*density; %Calculate the
total mass in a known period
tautime=mean(tauw,2);
tautime= mean(tautime(t1t:t2t)); %Calculate de
aveg shear stress on the wall during t1 and t2
Cftime = mean(Cf,2);
Cftime = mean(Cftime(t1t:t2t)); %Calculate de
aveg Friction Coef on the wall during t1 and t2
Retime = mean(Re,2);
Retime = mean(Retime(t1t:t2t)); %Calculate de
aveg Reynolds on the wall during t1 and t2
Nutime=0.023*Retime^(4/5)*Pr^(1/3);
end

```

pixresults.m

```

function
[avegconpix1,avegconpix2,avegconpix,avegvelpix,avegvolfowratepix,volumepix
, masspix, kpix, Sijpix, epspix, Ppix, netapix, tpix, taupix, Cfpix, Repix, Nupix]=pix
results(density, pixel, R, t1, t2, StandDev, kinvisc, Pr)
% Cleaning and Loading

positions = imread('position.bmp');
groups=loading();

cellsz = cellfun(@size,groups, 'uni', false);
M = cell2mat(cellsz);
groupsz = M(2:2:end);

%Number of zones

for i = 1:length (groups)
    zones(i) = (groupsz(i)-4)/3;
end

%Concentration

for i=1:length (groups)
    capgroupcon = groups(i);
    groupconint = cell2mat(capgroupcon);
    groupconint(:, ((zones(i)*2)+4):end) = [];
    groupconint(:, 1:3) = [];
    groupconplan1(i) = {groupconint(:, 1:2:end)};
    groupconplan2(i) = {groupconint(:, 2:2:end)};
    groupcon(i) = {groupconint};
end

%Velocity

for i = 1:length (groups)
    capgroupvel = groups(i);
    groupvelint = cell2mat(capgroupvel);
    groupvelint(:, 1:((zones(i)*2)+4)) = [];
    groupvel(i) = {groupvelint};
end

%Converting cell into matrices

matrixvel = cell2mat(groupvel);
matrixcon = cell2mat(groupcon);
matrixconplan1 = cell2mat(groupconplan1);
matrixconplan2 = cell2mat(groupconplan2);

%convertendo de cm/s para m/s
matrixvel=matrixvel*0.01;

%Time

capttime = cell2mat(groups(1));
time = capttime(:,1);

```



```

%Total plane area
totarea = pi*R^2;
%Area of pixel
pixarea = totarea/length(numpixels);
%base
ba=pixarea^(1/2);
hg=pixarea^(1/2);
totalhg=hg*32;

%
%Flowrate of each pixel
matrixconplan=squeeze(mean(cat(3,matrixconplan1,matrixconplan2),3));
flowratepix1=matrixconplan1.*matrixvel*pixarea;
flowratepix2=matrixconplan2.*matrixvel*pixarea;
flowratepix=matrixconplan.*matrixvel*pixarea;
frp1=flowratepix1(:,pixel);
frp2=flowratepix2(:,pixel);
frp=flowratepix(:,pixel);

%Total Volume

Volumeperpixel=flowratepix*time(2); %Volume per pixel per time
volumepertime=sum(Volumeperpixel,2); %Volme per time
volume=sum(volumepertime); %Total Volume
totalflowrate = sum(flowratepix,2); %Flowrate per time
%
%Turbulence
%Calculate the velocity gradient
gradvel=(matrixvel(:,wp)-matrixvel(:,dif))/ba;
matconwall=matrixconplan1(:,wp);
gradvel(matconwall<=0)=0;

%Calculate the Turbulence Kinectic Energy of each pixel
stdmatrixvel=std(matrixvel);
k=stdmatrixvel*3/2;
kmed=mean(k);

% Standart Deviation Gradient

gradstd=(stdmatrixvel(wp)-stdmatrixvel(dif))/ba;

%Rate of dissipation of turbulent kinetic energy

Sij=gradstd./2;
eps=2*kinvisc*Sij.^2;
epsmed=sum(eps);

%Turbulent Viscosity
C=0.09;
vt=C*kmed.^2/epsmed;

%Production
P=vt*gradvel.^2;
P=mean(P);
Pmed=mean(P);

%Kolmogorov
neta=((kinvisc^3)./eps).^ (1/4);

```

```

t=(kinvisc./eps).^ (1/2);

%Shear Tension
tauw=density*kinvisc*gradvel;
tauwmed=mean (mean (tauw));

%Friccion Coef
velwp=matrixvel (:,wp);
Cf=tauw./ (0.5*density*velwp.^2);
Cf (velwp<=0)=0;
Cfmed=mean (mean (Cf));

%Reynolds

Re=matrixvel*ba/kinvisc;
Ret=totalmeanvel*2*R/kinvisc;
Rew = velwp*ba/kinvisc;

%Nusselt

Nu=Cf.*Rew*Pr^(1/3)/2;
Numed=mean (mean (Nu));
%
poswp=find (wp==pixel);

%In the pixel
avegconpix1=avegconplan1pp (pixel); %Calculate the total
aveg concentration of plan 1 the pixel
avegconpix2=avegconplan2pp (pixel); %Calculate the total
aveg concentration of plan 2 the pixel
avegconpix=mean (avegconpp (pixel*2-1:pixel*2));
%Calculate the total aveg concentration in the pixel
avegvelpix=mean (avegvelpp (pixel)); %Calculate the
total aveg velocity in the pixel
avegvolfowratepix=mean (flowratepix (:,pixel)); %Calculate the total
aveg of volumetric flowrate in the pixel
volumepix=sum (Volumeperpixel (:,pixel)); %Calculate the total volume
in a known period
masspix=volumepix*density; %Calculate the
total mass in a known period
kpix=k (pixel);
Sijpix=Sij (poswp);
epspix=eps (poswp);
Ppix=P (poswp);
netapix=neta (poswp);
tpix=t (poswp);
taupix=mean (tauw (:,poswp));
Cfpix=mean (Cf (:,poswp));
Repix=mean (Re (:,pixel));
Nupix=0.023*Repix^(4/5)*Pr^(1/3);
end

```

pixtimeresuls.m

```

function [avegconpixtime1,avegconpixtime2,avegconpixtime,...
avegvelpixtime,avegvolfowratepixtime,volumepixtime,masspixtime,taupixtime,
Cfpixtime,Repixtime,Nupixtime]=pixtimeresults(density,pixel,R,t1,t2,StandDe
v,kinvisc,Pr)
% Cleaning and Loading

positions = imread('position.bmp');
groups=loading();

cellsz = cellfun(@size,groups,'uni',false);
M = cell2mat(cellsz);
groupsz = M(2:2:end);

%Number of zones

for i = 1:length (groups)
    zones(i) = (groupsz(i)-4)/3;
end

%Concentration

for i=1:length (groups)
    capgroupcon = groups(i);
    groupconint = cell2mat(capgroupcon);
    groupconint(:,((zones(i)*2)+4):end) = [];
    groupconint(:,1:3) = [];
    groupconplan1(i) = {groupconint(:,1:2:end)};
    groupconplan2(i) = {groupconint(:,2:2:end)};
    groupcon(i) = {groupconint};
end

%Velocity

for i = 1:length (groups)
    capgroupvel = groups(i);
    groupvelint = cell2mat(capgroupvel);
    groupvelint(:,1:((zones(i)*2)+4)) = [];
    groupvel(i) = {groupvelint};
end

%Converting cell into matrices

matrixvel = cell2mat(groupvel);
matrixcon = cell2mat(groupcon);
matrixconplan1 = cell2mat(groupconplan1);
matrixconplan2 = cell2mat(groupconplan2);

%convertendo de cm/s para m/s
matrixvel=matrixvel*0.01;

%Time

capttime = cell2mat(groups(1));

```

```

time = capttime(:,1);

%Number of pixels
numpixels = (1:size(matrixvel,2));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Statistics

% The pixels on the wall

wp=[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 19 20 21 22 23 24 25 38 39 40 41 42 59 60 61
62 81 82 83 84 105 106 107 108 131 132 133 134 159 160 161 188 189 190 217
218 219 248 249 278 279 280 309 310 311 342 343 374 375 406 407 438 439 470
471 502 503 504 533 534 535 564 565 594 595 596 623 624 625 652 653 654 679
680 681 682 705 706 707 708 729 730 731 732 751 752 753 754 771 772 773 774
775 788 789 790 791 792 793 794 801 802 803 804 805 806 807 808 809 810 811
812];
dif=[13 13 14 15 16 17 18 18 26 27 28 29 34 35 36 37 43 44 45 56 57 58 63
64 79 80 85 86 103 104 109 110 129 130 135 136 157 158 162 163 186 187 191
216 220 221 246 247 250 277 281 308 312 312 313 340 341 341 344 373 373 376
406 408 437 440 469 472 472 473 500 501 504 532 536 563 566 567 592 593 596
622 626 627 650 651 655 656 677 678 683 684 703 704 709 710 727 728 733 734
749 750 755 756 757 768 769 770 776 777 778 779 784 785 786 787 795 795 796
797 798 799 800 800];

%Deleting all the data more or less than N standard deviation
%Velocity

avegvelpp = mean(matrixvel, 1);
standvelpp = std(avegvelpp);
totalmeanvel = mean(avegvelpp);

for i=1:length (numpixels)
    for j=1:length(time)
        if matrixvel(j,i)>totalmeanvel+StandDev*standvelpp
            matrixvel(j,i)=totalmeanvel+StandDev*standvelpp;
        elseif matrixvel(j,i)<totalmeanvel-StandDev*standvelpp
            if matrixvel(j,i)~=0
                matrixvel(j,i)=totalmeanvel-StandDev*standvelpp;
            end
        end
    end
end

%Average per pixel
avegvelpp = mean(matrixvel, 1);

%Standard Deviation of velocity and concentration per pixel
standvelpp = std(avegvelpp);

%Total Average of Velocities and concentration
totalmeanvel = mean(avegvelpp);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Total plane area
totarea = pi*R^2;
%Area of pixel

```

```

pixarea = totarea/length(numpixels);
%base
ba=pixarea^(1/2);
hg=pixarea^(1/2);
totalhg=hg*32;

%
%Flowrate of each pixel
matrixconplan=squeeze(mean(cat(3,matrixconplan1,matrixconplan2),3));
flowratepix1=matrixconplan1.*matrixvel*pixarea;
flowratepix2=matrixconplan2.*matrixvel*pixarea;
flowratepix=matrixconplan.*matrixvel*pixarea;
frp1=flowratepix1(:,pixel);
frp2=flowratepix2(:,pixel);
frp=flowratepix(:,pixel);

%Total Volume

Volumeperpixel=flowratepix*time(2); %Volume per pixel per time
volumepertime=sum(Volumeperpixel,2); %Volme per time
volume=sum(volumepertime); %Total Volume
totalflowrate = sum(flowratepix,2); %Flowrate per time
%
%Turbulence
%Calculate the velocity gradient
gradvel=(matrixvel(:,wp)-matrixvel(:,dif))/ba;
matconwall=matrixconplan1(:,wp);
gradvel(matconwall<=0)=0;

%Calculate the Turbulence Kinectic Energy of each pixel
stdmatrixvel=std(matrixvel);
k=stdmatrixvel*3/2;
kmed=mean(k);

% Standart Deviation Gradient

gradstd=(stdmatrixvel(wp)-stdmatrixvel(dif))/ba;

%Rate of dissipation of turbulent kinetic energy

Sij=gradstd./2;
eps=2*kinvisc*Sij.^2;
epsmed=mean(eps);

%Turbulent Viscosity
C=0.09;
vt=C*kmed.^2/epsmed;

%Production
P=vt*gradvel.^2;
P=sum(P);
Pmed=mean(P);

%Kolmogorov
neta=((kinvisc^3)./eps).^(1/4);
t=(kinvisc./eps).^(1/2);

%Shear Tension

```

```

tauw=density*kinvisc*gradvel;
tauwmed=mean(mean(tauw));

%Friccion Coef
velwp=matrixvel(:,wp);
Cf=tauw./(0.5*density*velwp.^2);
Cf(velwp<=0)=0;
Cfmed=mean(mean(Cf));

%Reynolds

Re=matrixvel*ba/kinvisc;
Ret=totalmeanvel*2*R/kinvisc;
Rew = velwp*ba/kinvisc;

%Nusselt

Nu=Cf.*Rew*Pr^(1/3)/2;
Numed=mean(mean(Nu));

%
%Average in a known period

t1t=find(time==t1);
t2t=find(time==t2);
poswp=find(wp==pixel);

%During t1 and t2 in the pixelw
avegconpixmap1=mean(matrixconplan1(t1t:t2t,pixel)); %Calculate the
total aveg concentration of plan 1 of a pixel in a known period
avegconpixmap2=mean(matrixconplan2(t1t:t2t,pixel)); %Calculate the
total aveg concentration of plan 2 of a pixel in a known period
avegconpixmap=mean(matrixconplan(t1t:t2t,pixel));
avegvelpixmap=mean(matrixvel(t1t:t2t,pixel)); %Calculate the
total aveg velocity of a pixel in a known period
avegvolflowratepixmap=mean(flowratepix(t1t:t2t,pixel));
volumepixmap=sum(Volumeperpixel(t1t:t2t,pixel)); %Calculate the
total volume in a known period
masspixmap=volumepixmap*density;
taupixmap=mean(tauw(t1t:t2t,poswp));
Cfpixmap=mean(Cf(t1t:t2t,poswp));
Repixmap=mean(Re(t1t:t2t,pixel));
Nupixmap=0.023*Repixmap^(4/5)*Pr^(1/3);
end

```

plotdcont1.m

```

function [pos3d,normcon]=plot3dcont1(density,R,t1,t2,pixel,StandDev)

groups=loading();
cellsz = cellfun(@size,groups,'uni',false);
M = cell2mat(cellsz);
groupsz = M(2:2:end);

%Number of zones

for i = 1:length (groups)
    zones(i) = (groupsz(i)-4)/3;
end

%Concentration

for i=1:length (groups)
    capgroupcon = groups(i);
    groupconint = cell2mat(capgroupcon);
    groupconint(:,((zones(i)*2)+4):end) = [];
    groupconint(:,1:3) = [];
    groupconplan1(i) = {groupconint(:,1:2:end)};
    groupconplan2(i) = {groupconint(:,2:2:end)};
    groupcon(i) = {groupconint};
end

%Converting cell into matrices
matrixconplan1 = cell2mat(groupconplan1);
matrixconplan2 = cell2mat(groupconplan2);

%Time

capttime = cell2mat(groups(1));
time = capttime(:,1);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

t1t=find(time==t1);

%Data for 3D Plot of Velocity

diam=R*2*100;
pos3d=position3d(diam);

matrixconppt1=matrixconplan1(t1t,:);

%Adding the x and y coordinates of the vectors of Concentration
for i=1:812
    normcon(i)={[0 0 10*matrixconppt1(i)]};
end
end

```

animation.m

```

function [time,pos3d,normcon,anim]=animation(R,t1,t2)

groups=loading();

cellsz = cellfun(@size,groups,'uni',false);
M = cell2mat(cellsz);
groupsz = M(2:2:end);

%Number of zones

for i = 1:length (groups)
    zones(i) = (groupsz(i)-4)/3;
end

%Concentration

for i=1:length (groups)
    capgroupcon = groups(i);
    groupconint = cell2mat(capgroupcon);
    groupconint (:,((zones(i)*2)+4):end) = [];
    groupconint (:,1:3) = [];
    groupconplan1(i) = {groupconint(:,1:2:end)};
    groupconplan2(i) = {groupconint(:,2:2:end)};
    groupcon(i) = {groupconint};
end

%Velocity

for i = 1:length (groups)
    capgroupvel = groups(i);
    groupvelint = cell2mat(capgroupvel);
    groupvelint (:,1:((zones(i)*2)+4)) = [];
    groupvel(i) = {groupvelint};
end

%Converting cell into matrices

matrixvel = cell2mat(groupvel);
matrixcon = cell2mat(groupcon);
matrixconplan1 = cell2mat(groupconplan1);
matrixconplan2 = cell2mat(groupconplan2);

%convertendo de cm/s para m/s
matrixvel=matrixvel*0.01;

%Time

capttime = cell2mat(groups(1));
time = capttime(:,1);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Average in a known period

t1t=find(time==t1);
t2t=find(time==t2);

```

```
%Data for 3D Plot of Velocity

diam=R*2*100;
pos3d=position3d(diam);
matrixconppl1=matrixconplan1(t1t,:);

%Adding the x and y coordinates of the vectors of Concentration
for i=1:812
    normcon(i)={[0 0 10*matrixconppl1(i)]};
end
for t=1:358
    for i=1:812
        anim(t,i)={[0 0 10*matrixconplan1(t,i)]};
    end
end
end
```

Animationvelpix.m

```

function [time,pos3d,normcon,anim]=animationvelpix(R,t1,t2,pixel)

groups=loading();

cellsz = cellfun(@size,groups,'uni',false);
M = cell2mat(cellsz);
groupsz = M(2:2:end);

%Number of zones

for i = 1:length (groups)
    zones(i) = (groupsz(i)-4)/3;
end

%Concentration

for i=1:length (groups)
    capgroupcon = groups(i);
    groupconint = cell2mat(capgroupcon);
    groupconint(:,((zones(i)*2)+4):end) = [];
    groupconint(:,1:3) = [];
    groupconplan1(i) = {groupconint(:,1:2:end)};
    groupconplan2(i) = {groupconint(:,2:2:end)};
    groupcon(i) = {groupconint};
end

%Velocity

for i = 1:length (groups)
    capgroupvel = groups(i);
    groupvelint = cell2mat(capgroupvel);
    groupvelint(:,1:((zones(i)*2)+4)) = [];
    groupvel(i) = {groupvelint};
end

%Converting cell into matrices

matrixvel = cell2mat(groupvel);
matrixcon = cell2mat(groupcon);
matrixconplan1 = cell2mat(groupconplan1);
matrixconplan2 = cell2mat(groupconplan2);

%convertendo de cm/s para m/s
matrixvel=matrixvel*0.01;

%Time

capttime = cell2mat(groups(1));
time = capttime(:,1);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Average in a known period

t1t=find(time==t1);
t2t=find(time==t2);

```

```
%Data for 3D Plot of Velocity

diam=R*2;
pos3d=position3d(diam);
matrixconppl1=matrixconplan1(t1t,:);

%Adding the x and y coordinates of the vectors of Concentration
for i=1:812
    normcon(i)={[0 0 10*matrixconppl1(i)]};
end
for t=1:358
    anim(t)={[0 0 matrixvel(t,pixel)]};
end
end
```