

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

BRENDO BURILI

CARACTERIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS EM TROCADORES DE PLACAS  
SOLDADAS ATRAVES DA TÉCNICA PTV

Joinville  
2018

BRENDO BURILI

CARACTERIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS EM TROCADORES DE PLACAS  
SOLDADAS ATRAVES DA TÉCNICA PTV

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, Campus Joinville.

Orientador: Prof. Jorge Luiz Goes Oliveira, PhD.

Joinville

2018

BRENDO BURILI

**CARACTERIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS EM TROCADORES DE PLACAS  
SOLDADAS ATRAVES DA TÉCNICA PTV**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de bacharel em Engenharia Naval, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

**Joinville, 26 de Novembro de 2018**

---

Dr. Luis Fernando Peres Calil  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Jorge Luiz Goes Oliveira, Phd.  
(Orientador – Universidade Federal de Santa Catarina)

---

Prof. Kléber Vieira de Paiva, Dr.  
(Membro 1 – Universidade Federal de Santa Catarina)

---

Prof. Anderson Wedderhoff Spengler, Dr.  
(Membro 2 – Universidade Federal de Santa Catarina)

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço à minha família por todo apoio dado durante minha vida e em especial durante o período da faculdade.

Ao meu orientador, professor Jorge, pela motivação e ensinamentos, e por ter me oferecido a oportunidade de participar do grupo T2F, local onde tive a oportunidade de vivenciar novas experiências e promover meu crescimento pessoal.

Ao grupo T2F pelo apoio e orientação que me ofereceram ao longo desse final de curso de graduação.

Ao CNPq pelo incentivo de pesquisa no Brasil.

E aos colegas e amigos que fiz ao longo dessa jornada de graduação, meu sincero agradecimento.

## RESUMO

Trocadores de calor são utilizados amplamente na indústria. Eles têm como objetivo permitir a transferência de calor para fins de geração de energia ou resfriamento. Dentre os vários trocadores de calor, será investigado, nesse trabalho, um tipo de trocador de calor compacto denominado de trocador de calor de placas soldadas (*Plate & Shell Heat Exchange - PSHE*). Será aplicada a técnica experimental *Particle Tracking Velocimetry – PTV* para realizar a caracterização de um escoamento típico através das placas de um trocador de calor *PSHE*. Para permitir a visualização do escoamento, foi projetada e fabricada uma seção de testes transparente com geometria interna idêntica à de um canal de um *PSHE*. Partículas de dimensões conhecidas e com reduzida inércia são introduzidas no escoamento com o objetivo de permitir o rastreamento das mesmas através de câmera rápida. As posições das partículas no domínio da placa e ao longo do tempo são obtidas. Após processamento das imagens do escoamento em um software dedicado de *PTV* (Davis) é obtido o campo de velocidades. Foram observadas maiores velocidades na região central do canal.

**Palavras-chave:** *PSHE*; *PTV*; campo de velocidades.

## **ABSTRACT**

Heat exchangers are used extensively in the industry. They allow the transfer of heat from one medium to another in applications such as power generation or cooling. Compactness is an important attribute of a heat exchanger as to promote intensive heat transfer in a reduced volume. Among the compact heat exchangers, a recent type demands evaluation: Plate and Shell Heat Exchangers (PSHE). The present work aims at applying the experimental technique Particle Tracking Velocimetry (PTV) to characterize the fluid flow through a channel of a typical PSHE. To allow flow visualization, acrylic plates have been machined with their internal part matching the PSHE channel geometry. Particles with low inertia were inserted to allow flow tracking by a fast camera. After image processing in a dedicated PTV software (Davis), the flow field was obtained. Flow velocities are higher in the channel central region.

**Keywords:** PSHE; PTV; flow field.

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $\beta$  – Ângulo de Chevron. ( $^{\circ}$ )
- $p_{co}$  – Passo da Corrugação. (m)
- $b$  – Amplitude da Corrugação. (m)
- $D_p$  – Diâmetro de Port. (m)
- $L_v$  – Comprimento vertical entre centro dos Ports.(m)
- $L_{plate}$  – Comprimento vertical entre Ports. (m)
- $W_{plate}$  – Largura da seção máxima de escoamento. (m)
- $Re$  – Número de Reynolds.
- $G_{ch}$  – Velocidade mássica dos Canais. ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )
- $D_h$  – Diâmetro hidráulico das placas. (m)
- $\mu$  – Viscosidade dinâmica do fluido. (Pa.s)
- $w$  – Afastamento adicional entre as placas. (m)
- $\emptyset$  – Fator de Alagamento.
- $L_{w,med}$  – Largura média efetiva das placas. (m)
- $T_p$  – Tempo de escala da partícula.
- $\lambda_p$  – Comprimento de escala da partícula.
- $T_f$  – Tempo de escala do fluido.
- $\lambda_f$  – Comprimento de escala do fluido.
- $T_k$  – Tempo de escala de Kolmogorov.
- $\nu$  – Viscosidade Cinemática do fluido. ( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ )
- $\varepsilon$  – Dissipação de energia cinemática por unidade de massa.
- $u_t$  – Velocidade de cisalhamento na parede. ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
- $D$  – Distancia entre duas placas do trocador de calor. (m)
- $Re_b$  – *Bulk* Reynolds Number.
- $U_{TV}$  – Velocidade terminal.
- $C_D$  – Coeficiente de Arrasto.
- $d_{ploss}$  – Perda de carga na placa.
- $Q$  – Vazão volumétrica do fluido. ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ )
- $r$  – Raio da placa. (m)

## LISTA DE TABELAS E GRÁFICOS

Tabela 1 – Placas testadas. ....	31
Tabela 2 - Transdutores de Pressão. ....	35
Tabela 3 - Propriedades da Câmera. ....	37
Tabela 4 - Startup das placas.....	43
Tabela 5 – Áreas transversais ao escoamento.....	50

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Placas de trocador de calor PSHE.....	16
Figura 2 – Trocador de calor PSHE. ....	20
Figura 3 - Escoamento em um trocador PSHE .....	21
Figura 4 - Parâmetros geométricos do PSHE. ....	21
Figura 5 – Fluxograma das atividades. ....	25
Figura 6 - Fluxograma da bancada. ....	27
Figura 7 – Comparação entre escalas de tempo de partículas e fluido em função do diâmetro das partículas. ....	29
Figura 8 – Posicionamento da placa de calibração. ....	30
Figura 9 – Rotina de testes. ....	32
Figura 10 – Vazões utilizadas. ....	33
Figura 11 – Placa com dispositivo mecânico para controlar o espaçamento entre as placas.....	34
Figura 12 - Relógio Comparador com e sem o dispositivo mecânico para controlar o espaçamento entre as placas. ....	35
Figura 13 - Placa com fita Led. ....	38
Figura 14 - Filmagem de todo o canal.....	39
Figura 15 – Imagem do bocal de Saída .....	39
Figura 16 – Calibração do volume do canal. ....	40
Figura 17 – Interface do software Davis.....	41
Figura 18 - Zona de ar na seção de testes.....	42
Figura 19 - Bolhas no PSHE .....	43
Figura 20 - Espaçamento em função da vazão.....	44
Figura 21 - Placas Com Espaçamento.....	45
Figura 22 - Placas Sem Espaçamento. ....	45
Figura 23 - Trajetória de partícula fluida em PHEs. ....	46
Figura 24 - Trajetórias de partículas fluidas em PSHE para afastamento nulo (a) e afastamento da ordem de milímetros (b).....	47
Figura 25 - Campo de velocidade média: <b>a</b> (15°), <b>b</b> (45°). ....	48
Figura 26 - Campo de velocidade canal misto 15° /45°. ....	48
Figura 27 - Geometria da Placa. ....	49
Figura 28 - Vazão mássica, escoamento descendente.....	51

Figura 29 - Vazão mássica, escoamento ascendente .....	51
Figura 30 – Perfil de velocidade média para a região central ( $y=0$ ) do canal em escoamentos descendentes.....	52
Figura 31 - Perfil de velocidade média para a região central ( $y=0$ ) do canal em escoamentos ascendentes.....	52

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1 Objetivo Geral.....	17
1.2 Objetivos Específicos .....	17
<b>2 REVISÃO TEÓRICA .....</b>	<b>18</b>
2.1 Trocadores de Calor .....	18
2.1.1 Trocador de Calor PSHE .....	19
2.1.2 Geometria das placas do PSHE .....	21
2.2 Particle Tracking Velocimetry – PTV .....	23
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>25</b>
3.1 Preparação da Bancada.....	26
3.2 Partículas rastreadoras .....	27
3.3 Calibração do canal.....	30
3.4 Geometrias dos canais analisados.....	31
3.5 Condições experimentais .....	32
3.6 Controle e execução dos experimentos .....	33
3.6.1 Afastamento entre placas de acrílico que compõem o canal do PSHE .....	33
3.6.2 Medição de perda de Carga .....	35
3.6.3 Medição de Vazão .....	36
3.5 Geração das Imagens para PTV .....	36
3.5.1 Aquisição de Imagens.....	36
3.5.2 Iluminação .....	37
3.5.3 Bocais e Centro da Placa .....	38
3.6 Processamento de Imagens no Davis .....	39
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>42</b>
4.1 Startup.....	42
4.2 Perda de Carga .....	44

4.3	Trajelórias individuais no canal.....	46
4.4	Campo de velocidade no canal PSHE.....	47
4.5	Validação.....	49
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>54</b>
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	54

## 1 INTRODUÇÃO

Escoamentos complexos em trocadores de calor ocorrem em diversas aplicações de engenharia. Ocorrem em etapas de geração de vapor, reatores nucleares, refrigeradores, condicionadores de ar, bombas de calor, condensadores, evaporadores etc. Também ocorrem no condicionamento térmico do transporte de fluidos na indústria química, de petróleo e gás natural (Collier e Thome, 1996).

Na indústria petroquímica, a caracterização de escoamentos em trocadores de calor permite a modelagem e o dimensionamento dos permutadores, permitindo assim uma redução dos custos e dos desperdícios, aumento da produtividade e da melhora na qualidade de produção (WALPOT, 2007).

Este trabalho tem como forte motivação, o estudo de escoamentos em trocadores de calor típicos da indústria petroquímica. Nessa indústria, trocadores compactos são frequentemente encontrados; *i.e.* trocadores com elevada área de transferência de calor em um volume reduzido. Um novo tipo de trocador de calor compacto, Plate & Shell Heat Exchange – PSHE, surge como alternativa aos trocadores de calor de placas gaxetadas (PHE). Dessa forma, a caracterização do escoamento em um canal de um PSHE (Figura 1) permite sua modelagem e seu dimensionamento.

Figura 1 - Placas de trocador de calor PSHE.



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

A caracterização experimental do escoamento em um canal típico de um PSHE foi obtida a partir da descrição a seguir.

Com o objetivo de permitir a visualização do escoamento ao longo de um canal típico de um PSHE, dois tarugos de acrílico foram usinados com geometria idêntica a um canal formado por um par de placas do PSHE. Dessa forma, foi obtida a seção de testes onde escoamentos serão investigados.

Para controle dos escoamentos através da seção de testes, foi utilizada uma bancada experimental de escoamentos multifásicos, permitindo a geração e controle de escoamentos com uma, duas ou três fases (água, ar e óleo) através do canal do PSHE. Para a caracterização do escoamento no interior do canal transparente será utilizada a técnica experimental Particle Tracking Velocimetry – PTV.

A partir da determinação do campo de velocidades, é possível estimar fator de fricção e valores do número de Nusselt. Dessa forma, é possível comparar o desempenho de típicos trocadores da indústria de óleo e gás (placas gaxetadas, PHE) com o desempenho do trocador de placas soldadas (PSHE).

## 1.1 Objetivo Geral

Caracterizar o escoamento em um canal típico de um trocador de calor de placas soldadas (PSHE) através da técnica PTV.

## 1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a. Preparação da bancada multifásica para permitir escoamentos na seção de testes;
- b. Projetar e fabricar a seção de testes com material transparente (acrílico);
- c. Preparar o sistema de medição constituído de câmera rápida, iluminação, placa de calibração e seção de testes para aplicação de PTV;
- d. Realizar um tratamento de imagens em software dedicado de PTV (Davis);
- e. Validar e analisar o campo de vetores de velocidade gerado.

## 2 REVISÃO TEÓRICA

Neste capítulo será realizada uma introdução aos conceitos básicos relacionados a este trabalho. Entre eles estão os tipos de trocadores de calor, aspectos geométricos das placas de um trocador de calor do tipo PSHE, números adimensionais utilizados na engenharia térmica/hidráulica e metodologia para utilização da técnica PTV.

### 2.1 Trocadores de Calor

Trocadores de calor são dispositivos cuja função é promover a transferência de energia térmica entre dois ou mais fluidos em diferentes temperaturas. Trocadores são utilizados em uma variedade de aplicações como, por exemplo, na produção de energia, nas indústrias químicas e de alimentação, em engenharia ambiental, nos recuperadores de calor residuais, nas indústrias de manufatura etc. Trocadores de calor podem ser classificados de acordo com os seguintes critérios (KAKAÇ et al., 2012):

- Tipo: Recuperadores/Regeneradores;
- Processo de Transferência: Contato Direto ou Indireto;
- Geometria de Construção: Tubos, Placas e Superfície Estendida;
- Mecanismo de Transferência de Calor: Simples ou Dupla fase;
- Arranjo do Escoamento: Fluxo paralelo, Fluxo Inverso e Fluxo Cruzado.

Contudo, os diferentes tipos de trocadores de calor são geralmente classificados em função de suas geometrias construtivas. Entre os trocadores, os trocadores de geometria tubular, placas e superfícies estendidas são os mais comuns, podendo ser subdivididos, de acordo com KAKAÇ (2012), em:

1. Trocadores de Calor Tubular
  - Trocador de calor tipo Duplo Tubo
  - Trocador de calor tipo Placa e Tubo
  - Trocador de calor tipo Tubo Espiral
  
2. Trocador de Calor de Placas
  - Trocador de calor tipo Placa Engastada
  - Trocador de calor tipo Placa Espiral
  - Trocador de calor tipo Lamella
  
3. Trocador de Calor de Superfície estendida
  - Trocador de calor tipo Plate-Fin.
  - Trocador de calor tipo Tubular-Fin.

Como no presente trabalho será realizada a caracterização do escoamento através de um canal de um trocador de calor PSHE, serão apenas abordadas as características desse tipo de permutador.

#### 2.1.1 Trocador de Calor PSHE

Antes de revisar o trocador PSHE, são comentados os trocadores de calor casco e tubo, e de placas gaxetadas (PHE). Esses comentários são pertinentes, pois permitem comparação direta entre esses trocadores e o permutador PSHE.

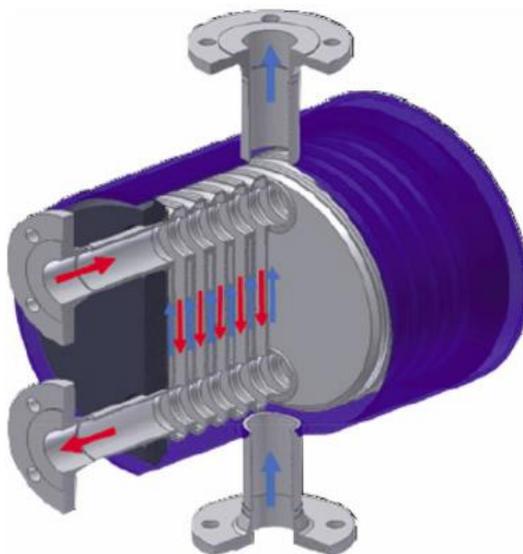
O trocador de calor casco e tubo (*Shell & Tube Heat Exchanger*) é o trocador de calor mais comumente encontrado em processos industriais. O mesmo possui uma série de tubos paralelos inseridos em um casco. A transferência de calor ocorre quando um primeiro fluido escoar no interior dos tubos, enquanto um segundo fluido escoar entre os tubos e o casco; ver ÇENGEL e GHAJAR, 2005. Esse trocador tem como características: alta resistência à pressão e à temperatura, e ausência de juntas. Contudo, é grande e pesado, ocorrendo várias incrustações.

O trocador tipo Plate & Frame Heat Exchanger (PHE) consiste de uma série de placas corrugadas que permite a passagem dos fluidos quente e frio de forma alternada.

As placas são separadas por gaxetas; ver ÇENGEL e GHAJAR, 2005. Este trocador é mais compacto que o trocador casco e tubo. O mesmo também apresenta elevadas taxas de transferência de calor, sendo pouco suscetível a incrustações. Contudo, possui limitações de pressão e temperatura; o que motivou o surgimento do trocador PSHE.

O permutador *Plate & Shell Heat Exchanger* (PSHE) é um modelo relativamente novo que vem sendo utilizado nas indústrias química e petroquímica (VAHTERUS, 2018). O mesmo possui características de funcionamento dos trocadores casco-tubo e PHE. Em seu núcleo, há uma série de placas onduladas de forma circular e alojadas em um vaso de pressão, ver Figura 2.

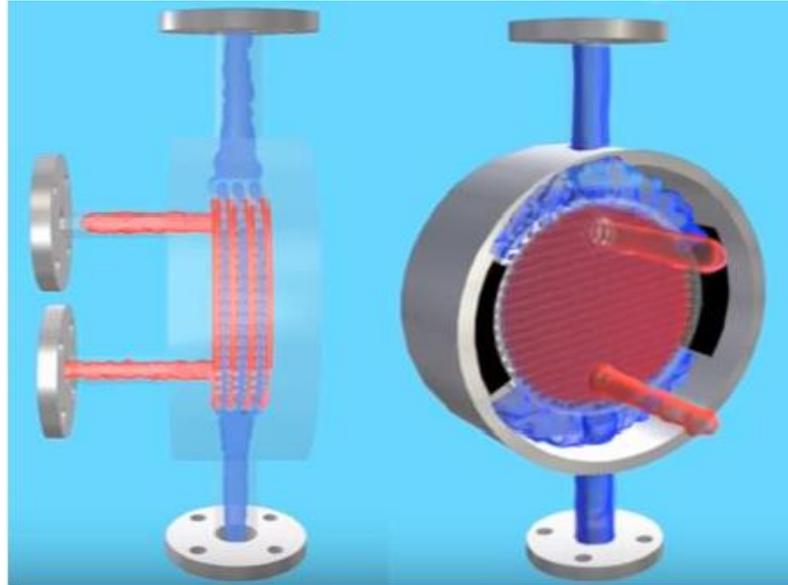
Figura 2 – Trocador de calor PSHE.



Fonte: Freire (2014).

As placas onduladas são produzidas em diversos materiais e diâmetros, e unidas por soldas. Os fluidos frio e quente escoam de forma alternada, de forma similar ao que ocorre no trocador PHE. Dessa forma, os fluidos não se misturam e percorrem toda a área superficial das chapas para a troca de calor; ver Figura 3.

Figura 3 - Escoamento em um trocador PSHE



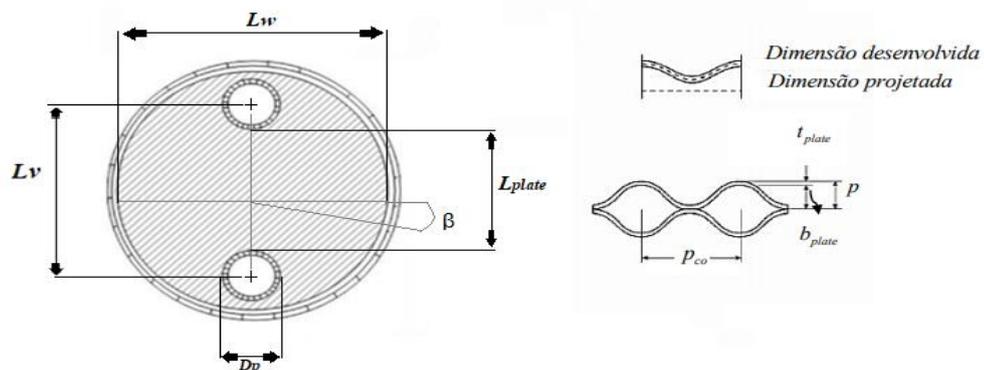
Fonte: Adaptado de Vahterus (2018).

O trocador PSHE tem como objetivo fornecer as vantagens de ambos os trocadores casco-tubo e PHE, compensando suas desvantagens. Dessa forma, trata-se de trocador compacto que pode resistir a elevadas pressões de trabalho.

### 2.1.2 Geometria das placas do PSHE

A seguir são apresentados parâmetros geométricos e características das placas do trocador de calor PSHE; ver Figura 4.

Figura 4 - Parâmetros geométricos do PSHE.



Fonte: Adaptado de Arsenyeva (2016).

Na figura 4, são destacados os seguintes parâmetros:

- Ângulo de Chevron ( $\beta$ ): Ângulo formado entre a linha da corrugação e a horizontal;
- Passo da corrugação ( $p_{co}$ );
- Amplitude da corrugação ( $b$ );
- Diâmetro da seção de entrada e saída, também denominado diâmetro do port ( $D_p$ );
- Comprimento vertical entre o centro dos Ports ( $L_v$ );
- Comprimento vertical entre Ports ( $L_{plate}$ );
- Largura da seção máxima de escoamentos ( $W_{plate}$ ).

Os números adimensionais pertinentes à presente aplicação, como o número de Reynolds e o fator de fricção, envolvem alguns dos comprimentos característicos apresentados acima. De modo a permitir uma abrangência maior dos experimentos que foram realizados, são abordados alguns números adimensionais que serão empregados ao longo dessa monografia. Para o cálculo do número de Reynolds para diferentes seções, foi utilizada a equação utilizada por Kakaç *et al.* (2012):

$$Re = (G_{ch} D_h) / \mu \quad (2.1)$$

Onde  $G_{ch}$  é a velocidade mássica dos canais (obtida através da razão entre vazão mássica e a área transversal ao escoamento),  $D_h$  representa o diâmetro hidráulico das placas, e  $\mu$  a viscosidade dinâmica do fluido.

Para calcular  $D_h$ , é preciso fazer uma adaptação das equações de Kakaç para corrigir a área de seção transversal e o diâmetro hidráulico; ver Equação 2.2. A definição anterior do número de Reynolds foi elaborada considerando-se a geometria retangular de um PHE.

$$D_h = \frac{4(b+w)(Lw, med)}{2(b+\emptyset Lw, med)} \approx \frac{2(b+w)}{\emptyset} \quad (2.2)$$

Na equação acima,  $w$  representa o afastamento adicional entre as placas, e  $\emptyset$  é definido como fator de alargamento. De acordo com o catálogo das placas de PSHE, seu

valor é definido como 1.1.  $Lw, med$  é a largura média efetiva da placa. Como se trata de uma placa de geométrica circular, é estimada sua largura média através da equação:

$$Lw, med = \frac{Lw}{2} + \sqrt{\left(\frac{Lw}{2}\right)^2 - \left(\frac{Lv}{2}\right)^2} \quad (2.3)$$

## 2.2 Particle Tracking Velocimetry – PTV

A técnica experimental Particle Tracking Velocimetry (PTV) é baseada na análise de trajetórias de partículas em imagens sequenciais. O rastreamento de pequenas partículas refletoras pode ser utilizado para obtenção de trajetórias e determinação do campo de velocidades do escoamento (Mass, 1993).

PTV é uma técnica experimental que permite a análise de campo de velocidades em perspectiva Lagrangiana. Ocorre o rastreamento de partículas introduzidas no escoamento. Suas trajetórias são gravadas por uma câmera de alta capacidade de aquisição de imagens, também conhecida como câmera rápida. Por se tratar de um método não intrusivo, apresenta vantagem em relação a outros métodos experimentais ao não perturbar o escoamento.

A técnica PTV pode ser empregada para gerar o campo de velocidades em 3D. Para isso, precisa de pelo menos 2 câmeras. Uma segunda para gerar perspectiva, e uma terceira para evitar ambiguidade na linha de projeção (Mass, 1993). Nesse trabalho, o campo de velocidades será obtido apenas em um plano de projeção. Não há informação com relação à posição da partícula em relação à parede. Dessa forma, serão obtidas informações médias em cada área discretizada de análise.

Antes ou após a filmagem do escoamento carregado de partículas rastreadoras, é realizada a calibração do espaço físico através de placa de calibração. A placa tem geometria conhecida, permitindo correlação com o sensor da câmera. Assim, é correlacionado o tamanho de cada pixel com a dimensão da coordenada real do canal.

O deslocamento que cada partícula percorreu é obtido ao correlacionar a taxa de aquisição de imagens (FPS) da câmera com os deslocamentos da partícula em cada

imagem. Dessa forma, as velocidades que a partícula desenvolveu ao longo de sua trajetória são conhecidas.

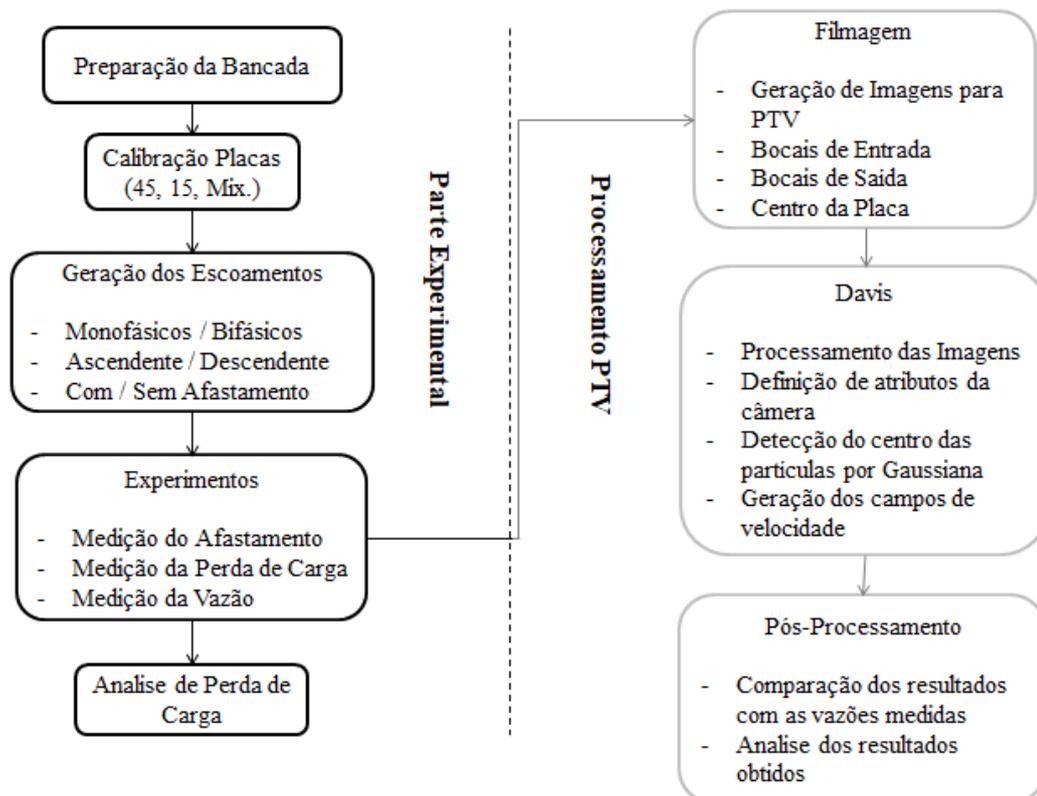
Na primeira imagem, cada partícula é reconhecida e identificada separadamente. Na imagem seguinte, tenta-se obter a nova posição de cada partícula a partir de informações sobre deslocamentos máximos e mínimos inseridos no algoritmo de processamento.

Após a geração das trajetórias, é necessário tratamento dos dados para validação das trajetórias. Há necessidade de eliminação de vetores “falsos” gerados pelo algoritmo. Esses vetores “falsos” podem ser gerados por restrições impostas pelo usuário do algoritmo PTV ou pela interpretação de “pontos falsos na imagem” interpretados como partículas.

### 3 METODOLOGIA

São descritas, nesse capítulo, a metodologia e as ferramentas utilizadas para a caracterização de um escoamento utilizando a técnica PTV. De modo a fornecer uma melhor compreensão dos procedimentos realizados ao longo dessa monografia, um fluxograma é elaborado conforme a Figura 5.

Figura 5 – Fluxograma das atividades.



Fonte: Autor (2018).

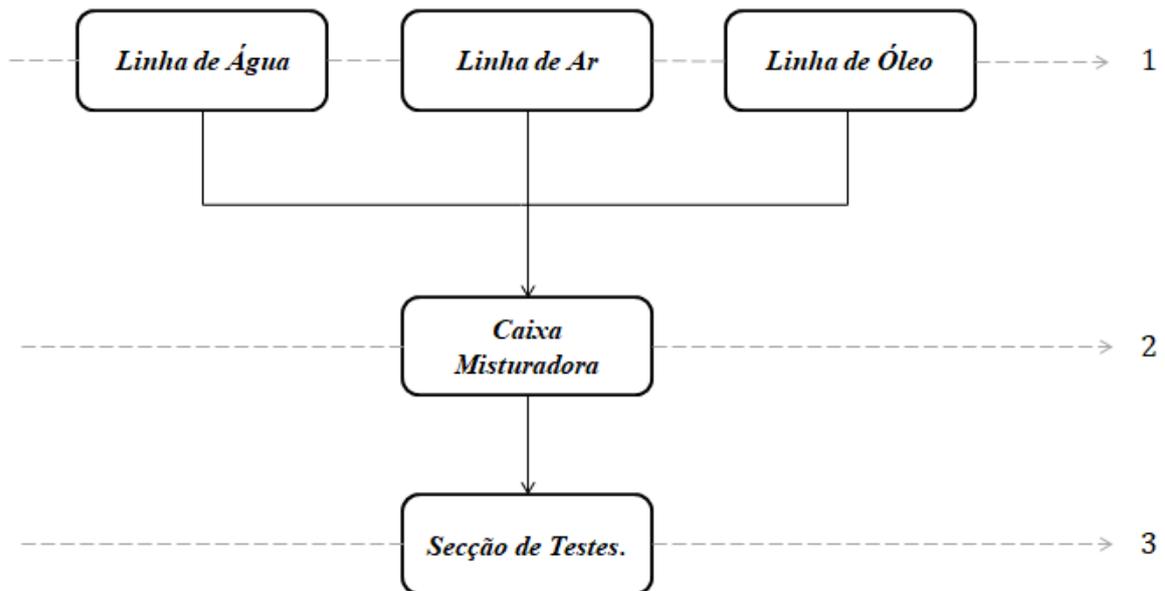
Percebe-se que os procedimentos podem ser separados em duas áreas distintas: a primeira área representa o âmbito experimental, incluindo atividades que foram realizadas na bancada de teste, calibração das placas, geração dos escoamentos, medições e filmagens para diferentes configurações de placas e escoamentos. A segunda parte aborda o processamento PTV e inclui as atividades relacionadas ao processamento das imagens, geração dos campos de velocidades pelo software Davis e a análise dos resultados obtidos.

### 3.1 Preparação da Bancada

Os escoamentos são gerados por bombas centrífugas e aferidos a partir das informações dos medidores de vazão Coriolis. Há linhas dedicadas para ar, água e óleo. No presente trabalho, escoamentos serão de água com pequenas concentrações volumétricas de partículas sólidas; concentrações menores que  $10^{-6}$  para evitar efeitos de dissipação viscosa. São posicionados transdutores de pressão diferencial e absoluta entre os bocais de entrada e saída das placas. Todos os transdutores e medidores estão conectados de forma remota a um computador onde foi desenvolvido um código no software Labview. Através desse código, é possível adquirir em tempo real informações dos sensores e medidores.

Nesta seção, será apresentado um breve fluxograma seguido de uma introdução aos elementos constituintes da bancada multifásica. O fluxograma é dividido em três seções: na Seção 1, representam-se os elementos que permitem a introdução e o controle dos escoamentos no sistema; na Seção 2, representa-se a união dos escoamentos de todas as linhas para permitir a geração de escoamentos variados; e na Seção 3, representam-se as seções de testes.

Figura 6 - Fluxograma da bancada.



Fonte: Autor (2018).

- Seção 1:
  - Bombas hidráulicas para as linhas de água e óleo;
  - Compressor para linha de ar;
  - Medidores Coriolis nas linhas de ar e óleo;
  - Medidor eletromagnético na linha de água.
- Seção 2:
  - Caixa de Mistura: Dispositivo criado com o intuito de promover a mistura dos fluidos e permitir a geração de escoamentos multifásicos.
- Seção 3:
  - Medidores Absolutos de Pressão.
  - Medidores Diferenciais de Pressão.
  - Aparato para fixação das Placas e seção de testes.

### 3.2 Partículas rastreadoras

Partículas de brita com diâmetro de 150  $\mu\text{m}$  e densidade de 1500  $\text{kg}/\text{m}^3$  são depositadas no escoamento de modo a permitir o rastreamento do campo de velocidades. Para que se possa assegurar que essas partículas se comportem como o fluido, é

necessário comparar escalas de comprimento e tempo das partículas e do escoamento. Denomina-se de escala de tempo e comprimento de escala das partículas como  $T_p$  e  $l_p$ , respectivamente. Essas devem ser inferiores às escalas de tempo e comprimento do fluido,  $T_f$  e  $l_f$ . O subscrito indicando p e f denotam partícula e fluido. A determinação do tempo de escala da partícula para um fluido estacionário é demonstrado por Albrecht et al. (2003) como:

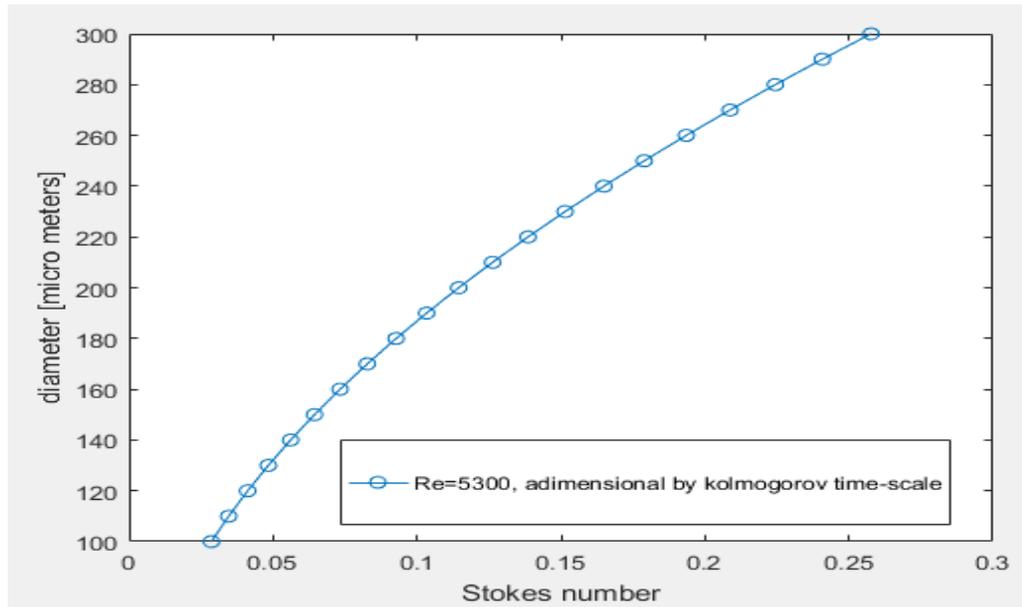
$$T_p = (d_p^2 \rho_p / 18\mu) \left(1 + \frac{0.5\rho_f}{\rho_p}\right) \quad (2.3)$$

Onde  $d$  é o diâmetro da partícula,  $\rho$  é a massa específica e  $\mu$  é a viscosidade dinâmica. Um tempo de escala foi obtido para o intervalo de diâmetro de 150 $\mu\text{m}$  até 300 $\mu\text{m}$  com passos de 10 $\mu\text{m}$ .

O tempo característico do fluido,  $T_f$ , representativo das escalas dissipativas pode ser obtido através de estimativas da escala de Kolmogorov,  $T_k$ . Será utilizado o Reynolds do duto de entrada anterior às placas para permitir uma estimativa de  $T_k$ . Para um dado escoamento não homogêneo em tubos, assume-se que o tempo de escala médio de Kolmogorov pode ser obtido por  $T_k = (\nu/\varepsilon)^{0.5}$ , onde  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido e  $\varepsilon$  representa a dissipação de energia cinemática por unidade de massa. Uma aproximação de  $\varepsilon$  pode ser obtida por  $\varepsilon = (d_{ploss}Q)/(\rho_f \pi r^2 b)$ , em que  $d_{ploss}$  é a perda de carga na placa,  $Q$  é a vazão volumétrica do fluido e  $r$  o raio da placa.

O tempo de escala de Kolmogorov é então comparado ao tempo de escalas das partículas inseridas no escoamento; ver Figura 7. A avaliação ocorre num intervalo de diâmetro de partículas de brita entre 100  $\mu\text{m}$  e 300  $\mu\text{m}$ . As escalas de tempo são comparadas na forma de razão através do número de Stokes (St). St é definido como a razão entre a escala de tempo da partícula a escala de tempo representativa do fluido. Esse número adimensional é utilizado para determinar se a partícula é capaz de acompanhar as flutuações que o fluido sofre. Valores de St menores que um indicam baixa inércia para as partículas.

Figura 7 – Comparação entre escalas de tempo de partículas e fluido em função do diâmetro das partículas.



Fonte: Autor (2018).

Para comparar as escalas de comprimento fluido e das partículas, é utilizado o comprimento de Kolmogorov para a escala do fluido. Baseando-se em medições de aceleração, Volk *et al.* (2008) observaram que partículas flutuantes neutras se comportam de forma semelhante ao fluido quando  $\frac{d}{l_k} < 2$ . Aqui,  $l_k$  é definido como o comprimento de Kolmogorov. Pode ser estimado como:  $l_k = (v^3/\varepsilon)^{1/4}$ , Com os parâmetros do escoamento de entrada na placa, obtém-se o valor de  $\frac{d}{l_k} = 0.685$ , para  $d_p$  igual a 200  $\mu\text{m}$ .

Por último, avalia-se a velocidade terminal da partícula,  $U_{TV}$ . Esta é analisada de forma a demonstrar se os efeitos gravitacionais podem ser desconsiderados. Esse termo é frequentemente utilizado para caracterizar suspensões, e é uma medida de velocidade de sedimentação que uma partícula pode atingir quando, em um fluido estacionário, há equilíbrio entre forças gravitacionais e de arrasto. A velocidade terminal é representada pela equação:

$$U_{TV} = \{(4(\rho_P - \rho_f) d_P g)/(3C_D \rho_f)\}^{1/2} \quad (2.3)$$

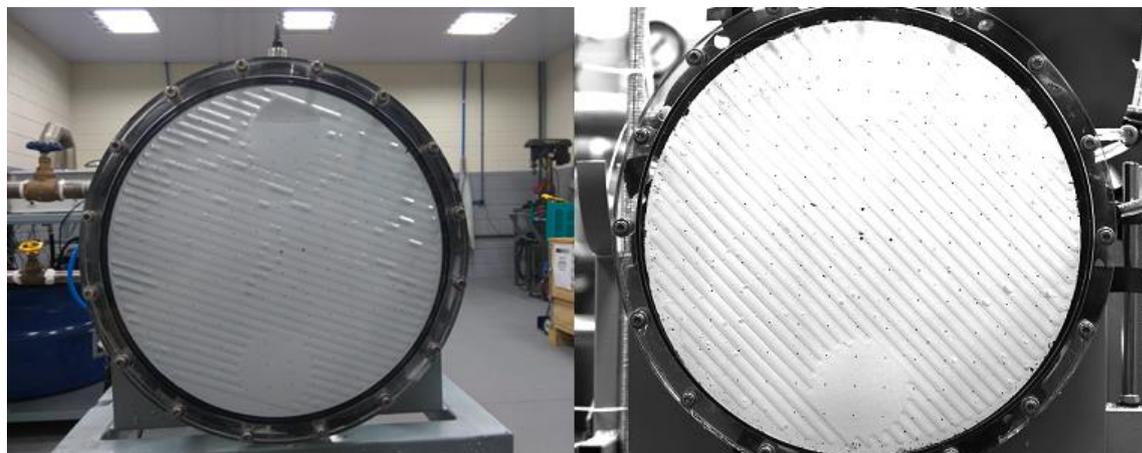
Onde  $g$  é a aceleração da gravidade e  $C_D$  é o coeficiente de arrasto. Esse último pode ser obtido por  $C_D = (24/Re_p)(1 + 0,166Re_p^{\frac{2}{3}})$ .  $C_D$  é uma função do número de Reynolds da partícula,  $Re_p = d_p U_{tv}/\nu$ .  $Re_p$  é baseado no diâmetro da partícula e na velocidade terminal. Portanto, é criada uma rotina iterativa até a convergência entre os valores de entrada e os valores calculados. Obteve-se  $U_{tv} = 0,0166$ .

### 3.3 Calibração do canal

A caracterização de escoamentos por medição ótica está fortemente relacionada com a capacidade de promover uma correta correlação do objeto que está sendo analisado com o sensor da câmera. É utilizado uma placa de calibração para este propósito. As dimensões dos elementos presentes nas filmagens variam em função da distância e do ângulo de visualização. Para isso um bom posicionamento da câmera de medição e uma correta calibração são fundamentais ao se buscar precisão na aplicação do PTV.

Para realizar a correlação entre os pixels da câmera e as coordenadas globais é utilizada uma placa de calibração de plástico com furos de 1mm de diâmetro e espaçados ordenadamente em 20 mm na horizontal e na vertical; ver Figura 8.

Figura 8 – Posicionamento da placa de calibração.



Fonte: Autor (2018).

A placa de calibração é posicionada entre as duas placas de acrílico. É registrada uma foto que será utilizada para a calibração. É importante ressaltar que após a realização da calibração, a câmera deve ser mantida na mesma posição de modo a garantir a precisão da medição ótica. Também é desejado que se realize a medição e a calibração em um intervalo curto de tempo, de modo que se evitem distúrbios óticos que podem ocorrer durante as filmagens. Como exemplo, citam-se que variações da temperatura do ambiente podem interferir nas qualidades da medição.

A câmera é posicionada a uma distância que varia entre 1 e 2 metros da secção de medição, dependendo da região em foco no canal. Em determinados testes, é preciso enquadrar toda a geometria do canal ou uma região particular do canal, como os bocais de entrada e saída. Para isso, foram utilizadas duas lentes distintas: uma lente angular para quando se desejava filmar a geometria toda da placa, e uma lente de zoom quando se desejava focar em um ponto específico da placa. Isso possibilitou a obtenção de imagens bem definidas.

### 3.4 Geometrias dos canais analisados

Foram realizados testes em três tipos de seções de PSHE com ângulos de Chevron diferentes. Como uma secção de um PSHE é composto por um par de placas, foi utilizado as combinações de placas conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Placas testadas.

<b>Combinações</b>	<b>Ângulo de Chevron</b>	
	<b>Placa 1</b>	<b>Placa 2</b>
<b>Secção 15x15</b>	<b>15</b>	<b>15</b>
<b>Secção Mix 15x45</b>	<b>15</b>	<b>45</b>
<b>Secção 45x45</b>	<b>45</b>	<b>45</b>

Fonte: Autor (2018).

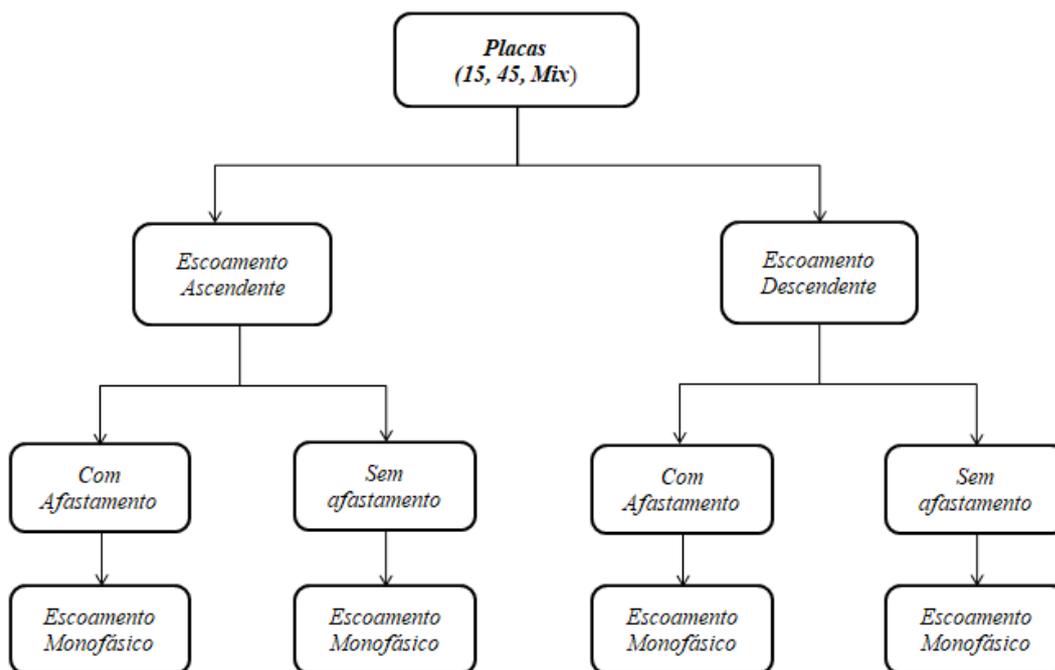
É esperado que placas com ângulo de Chevron iguala 15° apresentem uma maior perda de carga, pois sua corrugações estão projetadas quase que transversalmente as

linhas de fluxo, promovendo maior resistência ao escoamento. O oposto ocorre com placas de  $45^\circ$ . Uma situação intermediária é esperada para a combinação de uma placa de  $15^\circ$  e uma placa de  $45^\circ$ .

### 3.5 Condições experimentais

Com o objetivo de analisar o comportamento dos escoamentos no canal do PSHE em circunstâncias variadas, uma série de testes foram realizados. As condições experimentais são apresentadas nas Figuras 9 e 10.

Figura 9 – Rotina de testes.



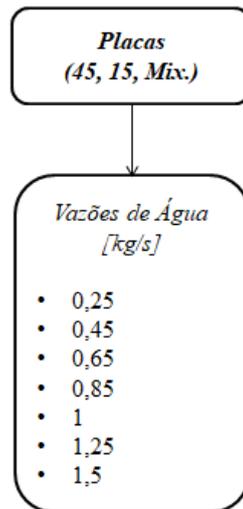
Fonte: Autor (2018).

Observe, na Figura 9, que foram adotados dois sentidos para o escoamento, ascendente e descendente. Optou-se por realizar as medições para essas duas direções para verificar se a aceleração da gravidade poderia interferir nos campos de velocidade. Para a sequência do trabalho, onde escoamentos bifásicos serão rastreados, a

aceleração da gravidade promoverá significativas mudanças nos padrões dos escoamentos.

Na Figura 10, observam-se as vazões de água testadas. A mínima vazão foi de 0,25 kg/s, e a máxima 1,5 kg/s.

Figura 10 – Vazões utilizadas.



Fonte: Autor (2018).

### 3.6 Controle e execução dos experimentos

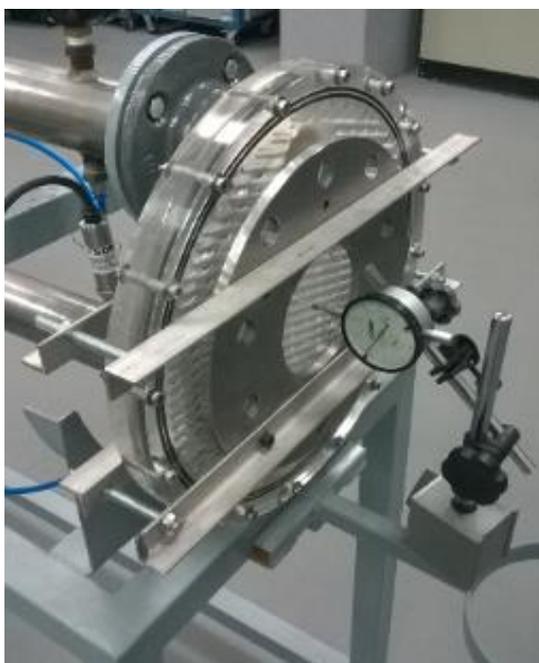
Durante a realização das filmagens dos escoamentos para aplicação da técnica PTV, foi realizada a aquisição de dados de outros parâmetros do escoamento no canal. O controle das variáveis independentes do experimento foi essencial para a análise dos resultados finais.

#### 3.6.1 Afastamento entre placas de acrílico que compõem o canal do PSHE

A magnitude do fluxo através do canal determina a pressão estática média no mesmo, podendo afastar as placas de acrílico. O controle do afastamento é essencial

para o correto cálculo do diâmetro hidráulico e da área da seção transversal ao escoamento. Note que alguns trocadores de calor PHE possuem afastamento considerável para permitir que partículas inerciais (e.g. bagaço de cana) não fiquem presas. A fim de controlar o espaçamento entre as placas foi desenvolvido um dispositivo mecânico de fixação a fim de aplicar ou reduzir torque em parafusos distribuídos. O dispositivo consiste basicamente de um par de chapas grossas de aço com reforçadores providos de uma ampla seção transversal. Os elevados momentos de inércia das chapas evitavam as próprias deflexões. Dessa forma, era possível o controle do afastamento.

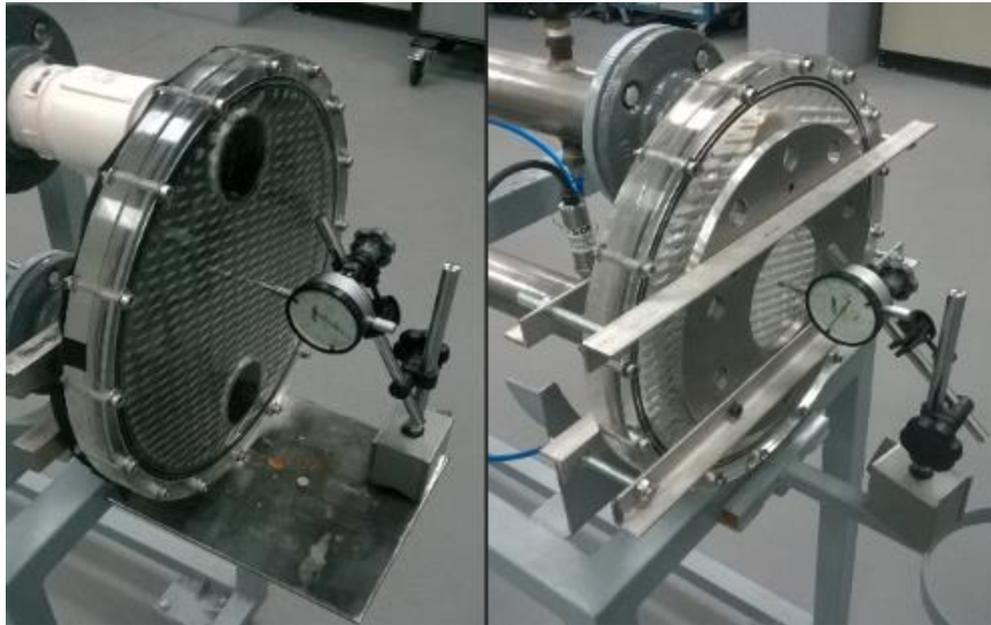
Figura 11 – Placa com dispositivo mecânico para controlar o espaçamento entre as placas.



Fonte: Autor (2018).

Como pode ser observado na figura 12, foram colocados nas faces externas das placas de acrílico dois relógios comparadores com precisão de 0.01 milímetros. Esses relógios são zerados quando a placa se encontra vazia. Quando as vazões são ajustadas na bancada, registra-se a aquisição do afastamento pelos relógios. Para obter um determinado nível de afastamento, aplica-se ou reduz-se o torque nos parafusos do dispositivo de controle.

Figura 12 - Relógio Comparador com e sem o dispositivo mecânico para controlar o espaçamento entre as placas.



Fonte: Autor (2018).

### 3.6.2 Medição de perda de Carga

A fim de controlar a perda na placa, foram instalados transdutores de pressão após os bocais de entrada e saída; As informações de perda de carga são essenciais para determinação de potência de bombeamento, e estimativas do fator de atrito e número de Nusselt. O transdutor diferencial utilizado é da marca Omega e é capaz de aferir diferenças de até 1 bar de diferença entre os bocais. As pressões mesuradas são enviadas para um computador remoto. Um transdutor de pressão absoluta é posicionado antes do bocal de entrada no canal; ver Tabela 2.

Tabela 2 - Transdutores de Pressão.

Transdutor de Pressão	Corrente	Range de Pressão	Precisão
	[mA]	[psi]	
<b>Diferencial PX409-015DWUI</b>	4 a 20	0 a 15	0.08% BSL
<b>Absoluta PX409-250GI</b>	4 a 20	0 a 250	0.08% BSL

Fonte: Autor (2018).

### 3.6.3 Medição de Vazão

Para a medição de vazão são utilizados dois medidores de Coriolis nas linhas de água e ar. A obtenção de medições precisas de vazão é essencial, para validação do método PTV. Será realizada conservação da massa em algumas seções transversais do canal a partir de velocidades médias locais e comparadas com as medições do Coriolis.

## 3.5 Geração das Imagens para PTV

A geração de imagens de qualidade para a aplicação da técnica PTV é de suma importância quando se deseja aplicar esse método de forma correta e precisa. A presença de “ruído ótico” nas imagens torna o processamento mais demorado, complicado e com baixa qualidade de informação. Por ruído ótico, entendem-se efeitos que prejudicam a qualidade da imagem das partículas no canal tais como iluminação a partir de fontes residuais de luz presentes no laboratório, presença de gordura nas paredes de acrílico perturbando a reflexão de luz nas partículas etc.

### 3.5.1 Aquisição de Imagens

Para a realização da aquisição de imagens foi utilizada a câmera SpeedSense da empresa Dantec. As propriedades da câmera se encontram na Tabela 3. Uma vez registradas, as imagens eram transferidas para o software da empresa Lavision Davis.

Tabela 3 - Propriedades da Câmera.

Maximum Resolution	1280 X 1024 pixels
Maximum Frame Rate	160,000 fps
Memory	4GB
Pixel Size	10 $\mu$ m x 10 $\mu$ m

Fonte: Autor (2018).

### 3.5.2 Iluminação

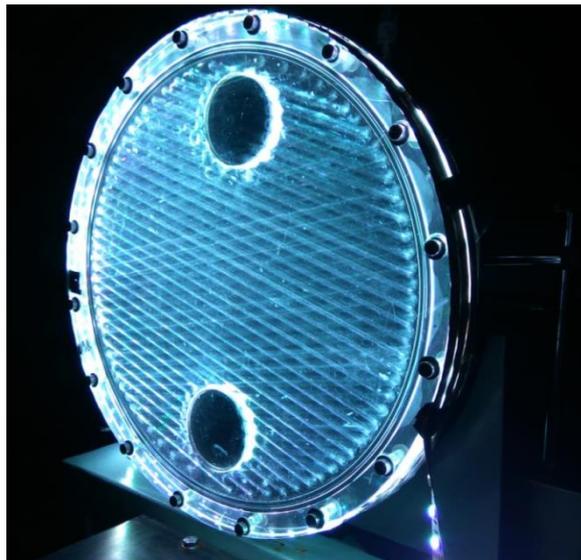
Uma correta incidência de luz sobre o escoamento é de grande importância quando se deseja evitar os problemas mencionados anteriormente a respeito de ruído ótico. No decorrer do trabalho, a geração de uma iluminação de qualidade se demonstrou um verdadeiro desafio. Observaram-se situações onde a iluminação proposta gerava muito reflexo na geometria das placas ou não havia um realçamento das partículas no escoamento de modo que não era possível detectá-las. Foram testados vários tipos de partículas, contudo, o que se demonstrou crucial no final era a fonte de iluminação, que até o momento não estava fornecendo uma iluminação homogênea nas placas.

Por fim foi utilizada uma fita Led enrolada em volta das placas de acrílico. Desse modo, a incidência de luz em torno da placa se tornou homogênea. Ainda mais importante, a direção de incidência evitou reflexo de luz que “poluía” a imagem.

Foi utilizada uma fita de Led RGB de 5 metros com tensão 220V. Esta é capaz de gerar quatro cores diferentes (branco, vermelho, verde e azul) através de um controle remoto que permite variar a frequência. Foi observado no decorrer dos testes que a cor branca fornecia uma melhor visualização da partícula no escoamento; ver Figura 13.

É necessário verificar se a frequência de luz emitida pelas lâmpadas LED não é igual ou próxima à frequência de aquisição de imagens da câmera rápida. Pode ocorrer a variação da intensidade de iluminação na placa no decorrer da gravação, prejudicando a qualidade do processamento das imagens no software Davis.

Figura 13 - Placa com fita Led.



Fonte: Autor (2018).

### 3.5.3 Bocais e Centro da Placa

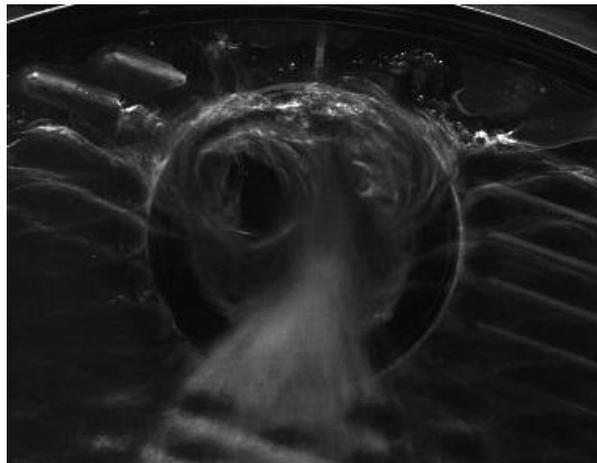
A fim de obter informações em diferentes regiões da placa, foram realizadas filmagens para caracterização do escoamento nos bocais de entrada e saída, e no centro do canal (ver Figura 14). Algumas características do escoamento puderam ser facilmente notadas ao analisar as imagens sem qualquer tipo de processamento no Davis. Nos bocais de entrada, o escoamento é bem-comportado e sai de forma radial, independentemente se o fluxo é ascendente ou descendente. Há formação de vórtices nos bocais de saída (independentemente da direção do escoamento); ver Figura 15. Também é possível perceber que o campo de velocidades é maior nas regiões de centro. Essas observações serão abordadas nos resultados.

Figura 14 - Filmagem de todo o canal.



Fonte: Autor (2018).

Figura 15 – Imagem do bocal de Saída



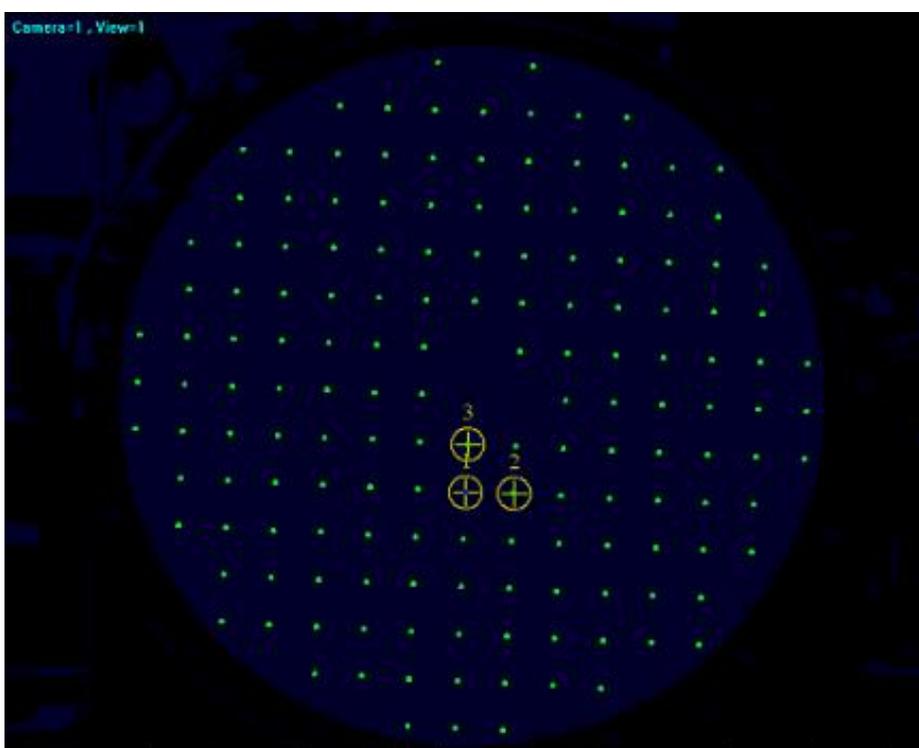
Fonte: Autor (2018).

### 3.6 Processamento de Imagens no Davis

DaVis é um programa de processamento de imagens desenvolvido pela empresa LaVision com algoritmos para aplicação de técnicas óticas como PTV e Particle Imaging Velocimetry - PIV.

O processamento de imagens é resumido a seguir. É necessário criar um novo projeto, onde é definida a análise que se deseja realizar (PTV ou PIV). Em seguida, é necessário realizar a calibração do espaço físico que estará sendo analisado (no presente caso, o volume do canal). Uma vez realizada a calibração, todas as imagens do escoamento estão sujeitas às escalas de calibração. É possível aplicar alguns filtros nas imagens de calibração de modo a facilitar a localização dos pontos de referência; ver Figura 16.

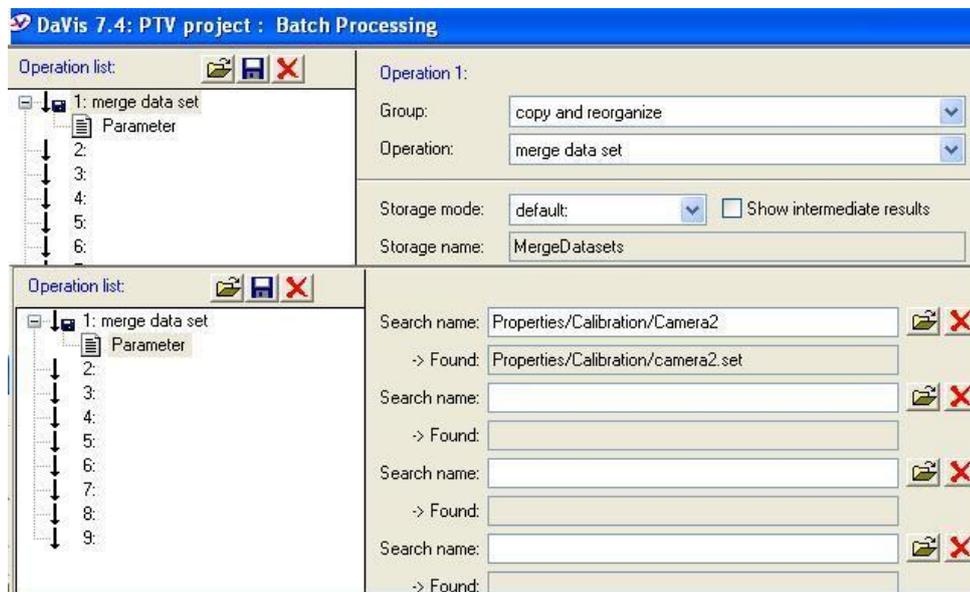
Figura 16 – Calibração do volume do canal.



Fonte: Autor (2018).

Posteriormente, são aplicados filtros de imagem para os arquivos do escoamento. O objetivo é reduzir a influência de “ruídos” como pontos de reflexão, facilitando a identificação das partículas pelo software Davis. São apresentados, a seguir, os principais parâmetros selecionados na programação do PTV-Davis; ver interface na Figura 17.

Figura 17 – Interface do software Davis



Fonte: Autor (2018).

- Add Defaut Attributes: Define a frequência de captação utilizada na câmera;
- Create Multi-frame Buffer: Define a forma como as imagens estão relacionadas de forma sequencial;
- Enchance Contrast Betwen Particle and Background: varia o contraste entre a partícula e o plano de fundo;
- Apply Masking Function: permite aplicar máscaras geométricas ou algorítmicas em regiões especifica da placa de modo a remover ruídos locais ou incrementar contraste entre a partícula e o plano de fundo;
- Apply Linear Filter: aplica uma função Gaussiana que visa facilitar a detecção da partícula e de seu centro geométrico;
- 2D-PTV: Particle Detection: identificar as partículas em uma imagem e gera o campo de vetores do escoamento.

A partir da aplicação desses parâmetros, é possível gerar campos de velocidades no canal e exportá-los posteriormente para processamento de estatísticas.

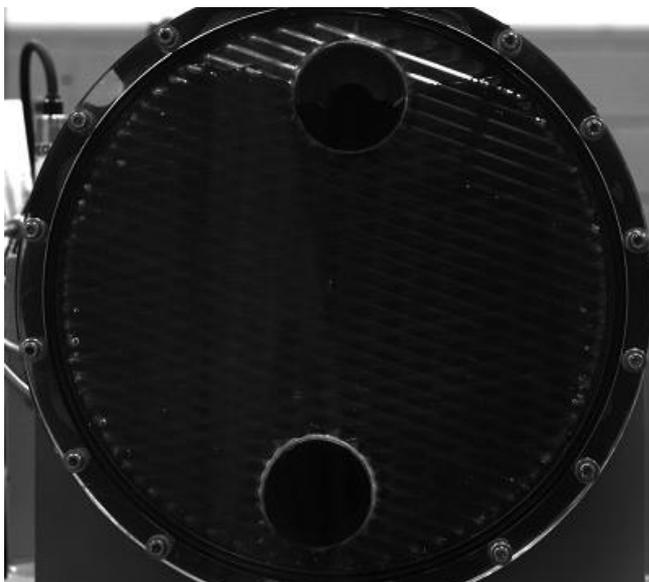
## 4 RESULTADOS

### 4.1 Startup

Foram realizadas filmagens do startup de modo a visualizar o preenchimento do canal com o fluido de trabalho (água) para diferentes vazões. Foi observado que a baixas vazões de água não ocorria o preenchimento total do canal, permanecendo zonas de ar ou bolhas na parte superior das placas; ver Figuras 18 e 19. Essa observação ocorre em ambos os sentidos do escoamento.

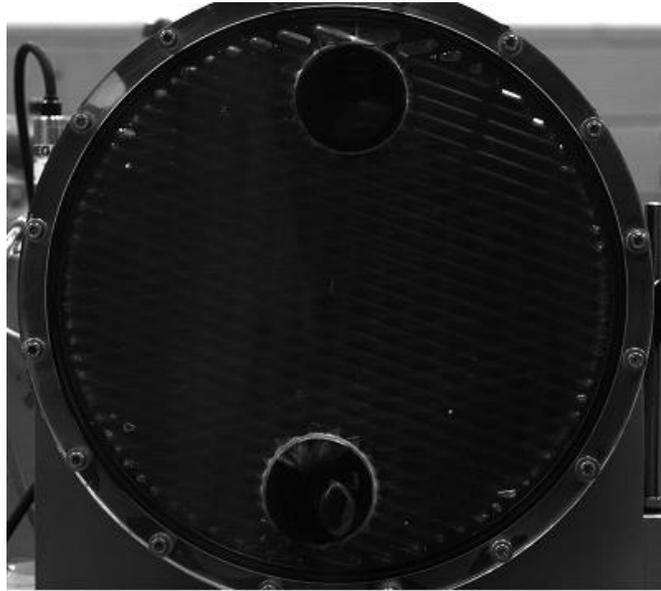
A baixas velocidades, o arrasto do fluido de trabalho sobre o ar aprisionado não é suficiente para movê-lo da região estagnada. Quando a vazão de água aumenta, ar não permanece no canal. Para operar o trocador sem ar a baixas vazões, é necessário operá-lo momentaneamente com vazões elevadas com posterior redução gradual.

Figura 18 - Zona de ar na seção de testes.



Fonte: Autor (2018).

Figura 19 - Bolhas no PSHE



Fonte: Autor (2018).

O percentual de enchimento da placa é apresentado na Tabela 4. Valores de preenchimento variaram entre 95 e 100% para vazões volumétricas entre 0,000019 e 0,00128 m<sup>3</sup>/s. O tempo para atingir uma configuração estável também é apresentado. A presença de bolhas no bocal superior foi notada em alguns casos.

Tabela 4 - Startup das placas.

<i>Vazão [m<sup>3</sup>/s]</i>	<i>Start-Up</i>	<i>Tempo [s]</i>	<i>Enchimento da Placa</i>	<i>%</i>
0,00019	<i>Ascendente</i>	5.17	<i>Parcial</i>	95,1
	<i>Decedente</i>	27.18	<i>Parcial</i>	95
0,00033	<i>Ascendente</i>	4.52	<i>B.B.S</i>	98,4
	<i>Decedente</i>	20.58	<i>B.B.S</i>	98,5
0,00049	<i>Ascendente</i>	3.8	<i>B.B.S</i>	99,6
	<i>Decedente</i>	7.16	<i>B.B.S</i>	98,8
0,00067	<i>Ascendente</i>	3.4	<i>B.B.S</i>	99,5
	<i>Decedente</i>	6.54	<i>B.B.S</i>	99
0,00087	<i>Ascendente</i>	3.2	<i>Total</i>	100
	<i>Decedente</i>	4.8	<i>Total</i>	100
0,00107	<i>Ascendente</i>	3	<i>Total</i>	100
	<i>Decedente</i>	4.6	<i>Total</i>	100
0,00128	<i>Ascendente</i>	1.88	<i>Total</i>	100
	<i>Decedente</i>	3.48	<i>Total</i>	100

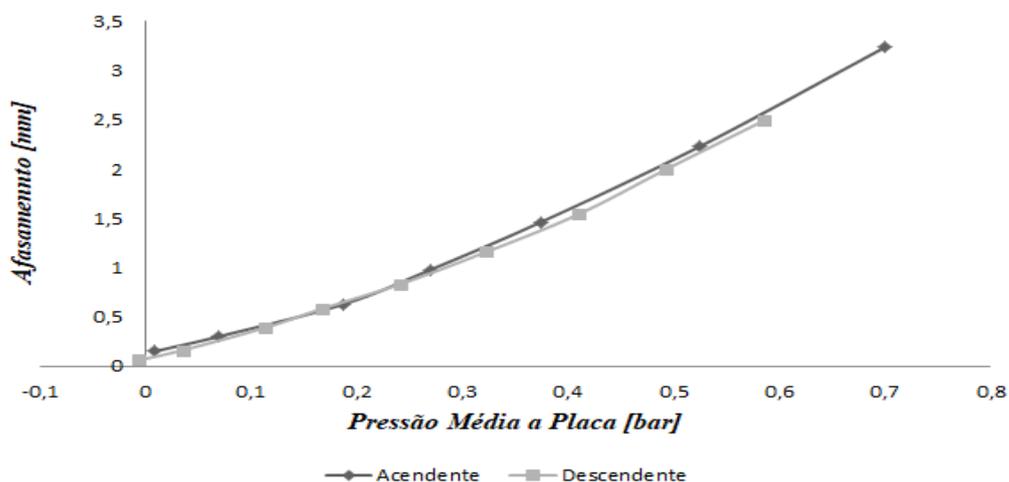
*\*B.B.S : Bolhas no Bocal Superior*

Fonte: Autor (2018).

## 4.2 Perda de Carga

Na ausência do dispositivo mecânico para controle do afastamento, à medida que a vazão aumenta a pressão estática também aumenta, alargando a área de seção transversal ao escoamento. Nesse caso, a queda de pressão não apresenta comportamento quadrático em função da vazão. Note na Figura 20, o comportamento do afastamento em função da vazão sem o dispositivo mecânico de fixação.

Figura 20 - Espaçamento em função da vazão.



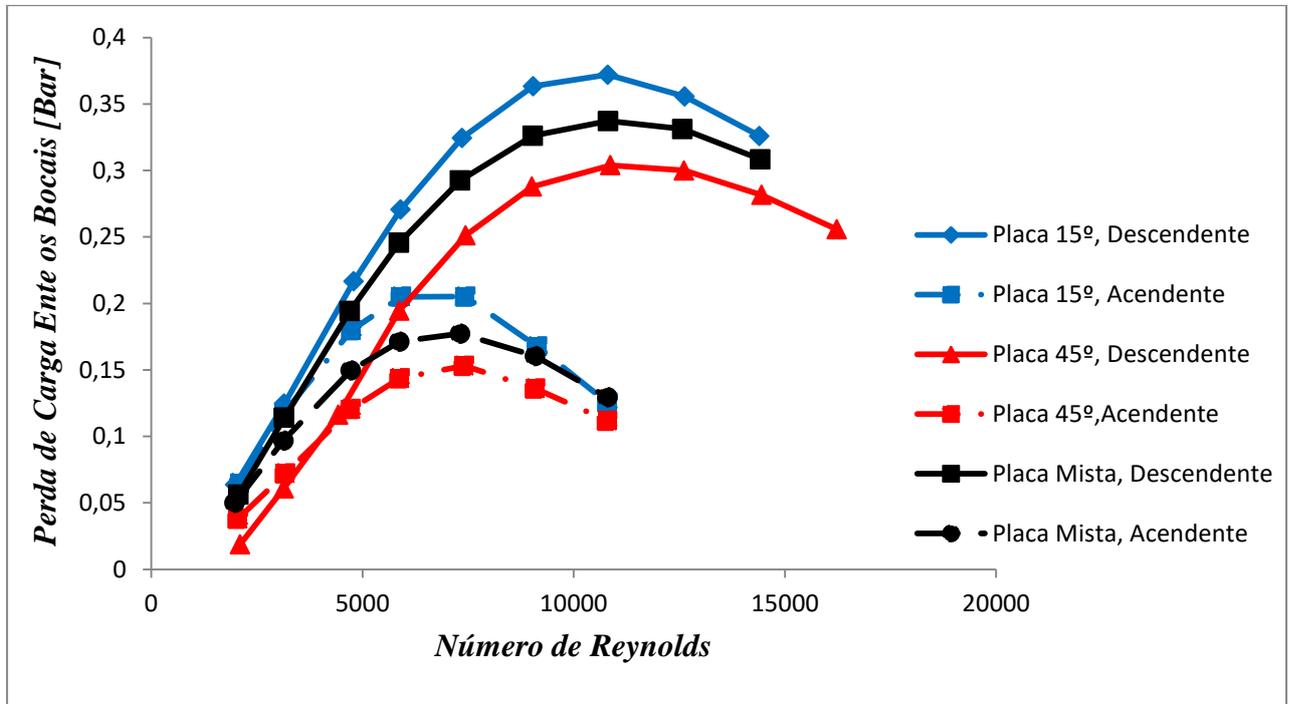
Fonte: Autor (2018).

Foram medidos valores de perda de carga em duas situações distintas: sem dispositivo (afastamento segundo Figura 20); ver Figura 21, e com dispositivo de fixação (sem afastamento); ver Figura 22. Os resultados são apresentados em função do Reynolds médio do canal.

Os maiores e menores valores de perda de carga no escoamento podem ser encontrados nas placas com ângulo de Chevron de  $15^\circ$  e  $45^\circ$ , respectivamente. Valores intermediários são obtidos para a placa mista  $15^\circ/45^\circ$ . Quanto menor o ângulo das ondulações com a horizontal, maior será a resistência imposta ao escoamento pelas placas e, dessa forma, mais elevada será a perda de carga. Esse resultado também ocorre quando há afastamento entre as placas. Note também que se o afastamento das

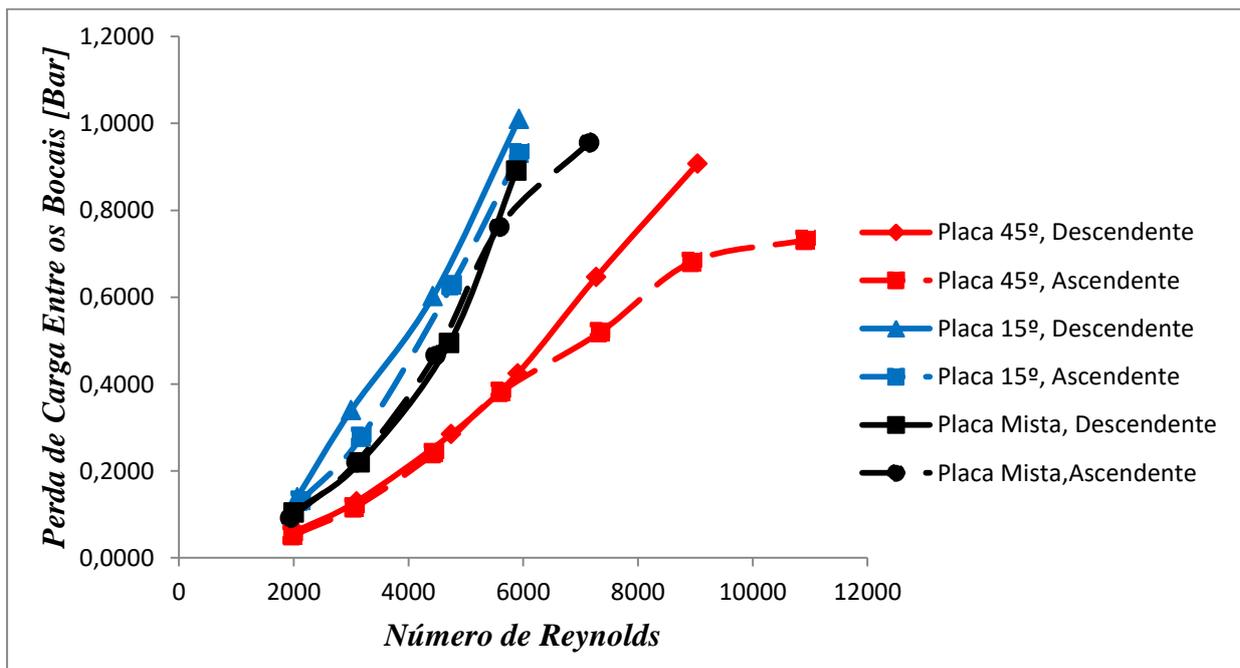
placas for evitado, os valores de queda de pressão apresentarão comportamento quadrático em função da vazão.

Figura 21 - Placas Com Espaçamento.



Fonte: Autor (2018).

Figura 22 - Placas Sem Espaçamento.

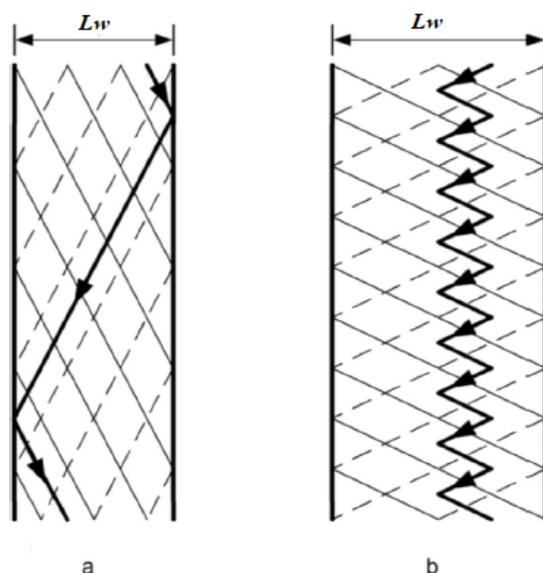


Fonte: Autor (2018).

### 4.3 Trajetórias individuais no canal

Focke and Knibber (1986) identificaram que as trajetórias de partículas fluidas em PHE são afetadas pelo ângulo de Chevron e pelo número de Reynolds do escoamento; ver Figura 23. Para altos valores de número de Reynolds e Chevron, o fluido escoa em trajetórias mais curtas entre a entrada e a saída das placas (23a). O tempo de residência é menor nesse tipo de trajetória. Para valores baixos do número de Reynolds e do ângulo de Chevron, o fluido tem deslocamentos laterais médios baixos, mas com alta frequência de oscilação (23b). A partícula fluida percorre uma trajetória do tipo “ziguezague”.

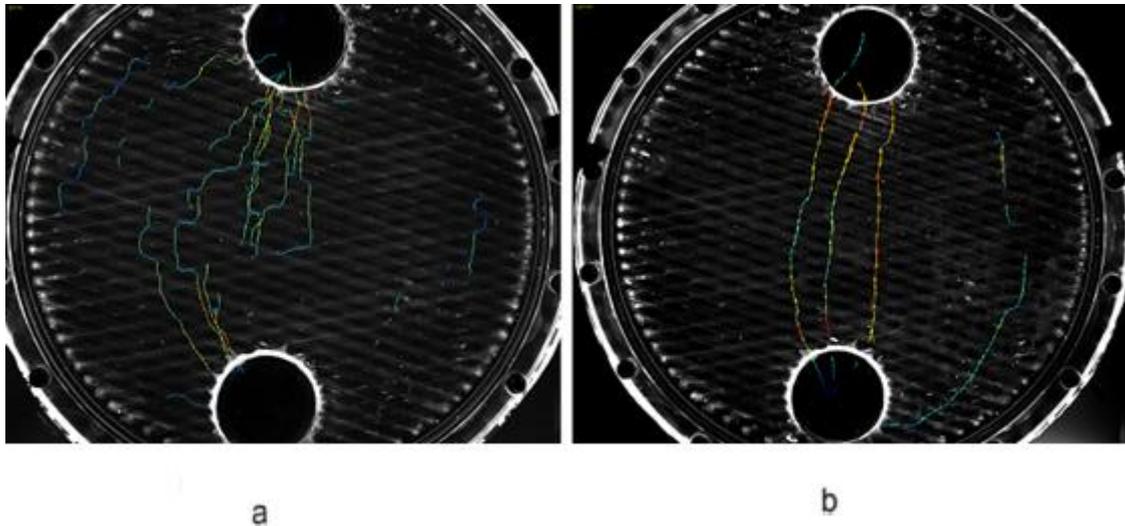
Figura 23 - Trajetória de partícula fluida em PHEs.



Fonte: Adaptado de Grabenstein (2017).

Na análise PTV no canal do PSHE, também foi observado que a resistência ao escoamento da partícula fluida interfere em sua trajetória. Quando o afastamento é zero, trajetórias similares às observadas na Figura 23b, são observadas na Figura 24a. Note que em algumas a restrição ao movimento na direção vertical promove velocidades laterais elevadas. Com afastamento significativo (Figura 24b), a resistência ao escoamento no canal é reduzida e, dessa forma, as trajetórias se tornam “lineares”.

Figura 24 - Trajetórias de partículas fluidas em PSHE para afastamento nulo (a) e afastamento da ordem de milímetros (b).



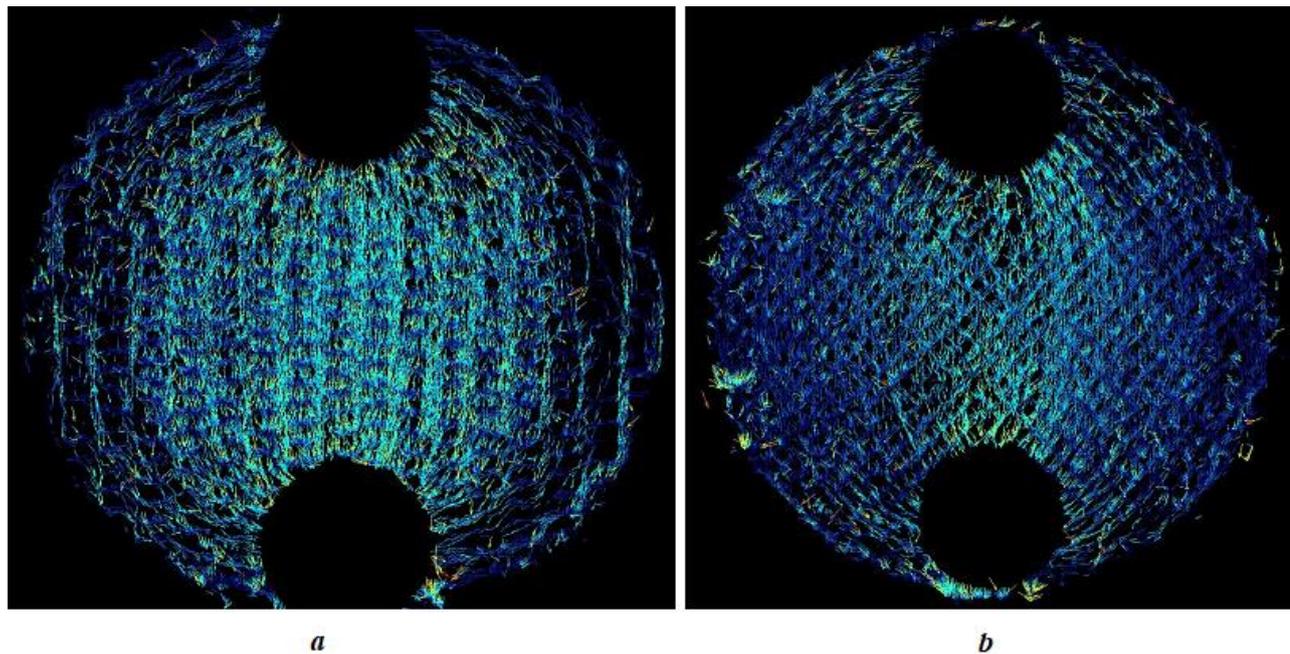
Fonte: Autor (2018).

#### 4.4 Campo de velocidade no canal PSHE.

Campos de velocidades de filmagens típicas e processadas no software Davis são apresentados nas Figuras 25a ( $15^\circ$ ), 25b ( $45^\circ$ ) e 26 (mista  $15^\circ/45^\circ$ ). Nota-se que, apesar da presença do elevado número de vetores espúrios, é possível distinguir a intensidade da velocidade média local no canal. Note que os vetores espúrios tendem a aparecer nas bordas das placas (baixas velocidades e excesso de ruído).

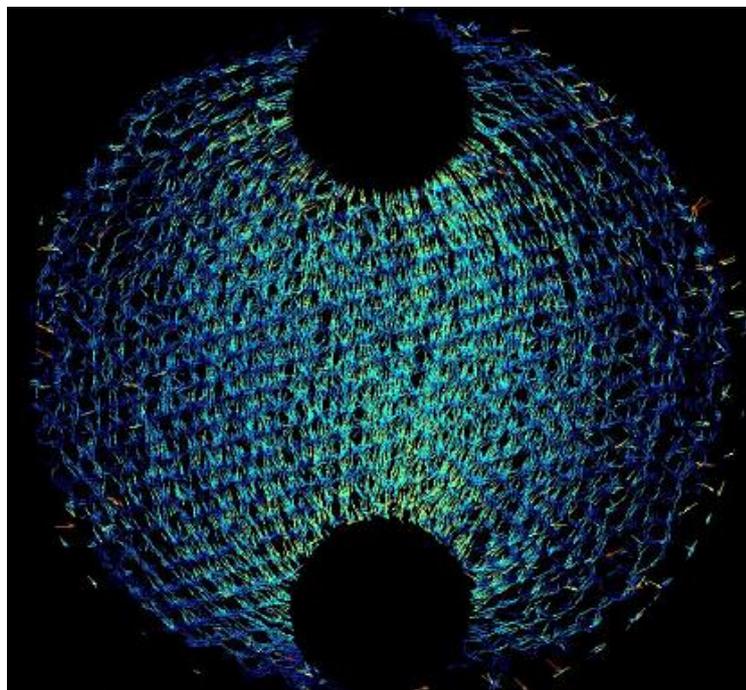
Note que independente da configuração, as maiores velocidades são observadas no centro da placa entre os bocais (cores entre amarelo e verde). As menores velocidades ocorrem nas extremidades do canal (cor em azul). Note que a vazão medida pelo Coriolis é a mesma. Dessa forma, as maiores velocidades locais (e os maiores coeficientes de troca de calor), são obtidas quando há menor resistência ao escoamento  $45^\circ$  numa faixa relativamente estreita do canal. Nesse mesmo caso, as velocidades locais são reduzidas ao se afastar do centro da placa. Quando a resistência ao escoamento é aumentada ( $15^\circ$ ), o campo de velocidades se torna mais homogêneo.

Figura 25 - Campo de velocidade média: **a** ( $15^\circ$ ), **b** ( $45^\circ$ ).



Fonte: Autor (2018).

Figura 26 - Campo de velocidade canal misto  $15^\circ / 45^\circ$ .

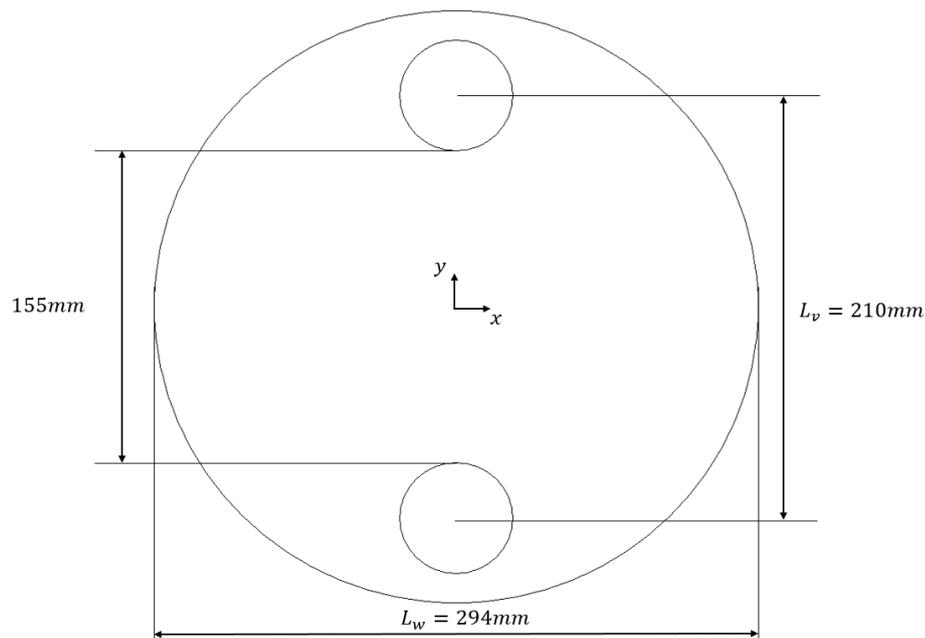


Fonte: Autor (2018).

#### 4.5 Validação

Para confirmar a validade do campo médio de velocidades obtido através da técnica PTV, o fluxo mássico calculado através de seções transversais ao escoamento foi comparado às medições de vazão obtidas pelo medidor Coriolis. Através de modelo CAD do canal, é possível calcular os valores da área transversal das placas em diferentes posições axiais. Discretizando uma dada seção transversal e multiplicando pela velocidade média local e pela massa específica da água, obtém-se o fluxo mássico.

Figura 27 - Geometria da Placa.



Fonte: Autor (2018).

Na Figura 27 são observados a vista de topo do canal do PSHE e o sistema de coordenadas adotado. Na posição  $y=0$ , tem-se a seção transversal central da placa. O valor da seção transversal para as três configurações de placas (sem afastamento) é apresentado na Tabela 5 para o intervalo  $-65 < y [\text{mm}] < 65$ . Na última coluna da Tabela 5, é apresentado o acréscimo de área transversal ao escoamento devido à existência de um pequeno afastamento (0,4 mm) para a vazão utilizada ( $\sim 0,51 \text{ kg/s}$ ) na validação do

método PTV. A área de seção transversal efetivamente testada é representada através da Eq. (4.1):

$$A_{real} = A_{medida} + 2 \frac{0,4}{\pi} \text{Sen}\left(\frac{L(y)\pi}{2L_w}\right) \quad (4.1)$$

Onde  $L(y)$  é a dimensão lateral em uma dada posição axial.

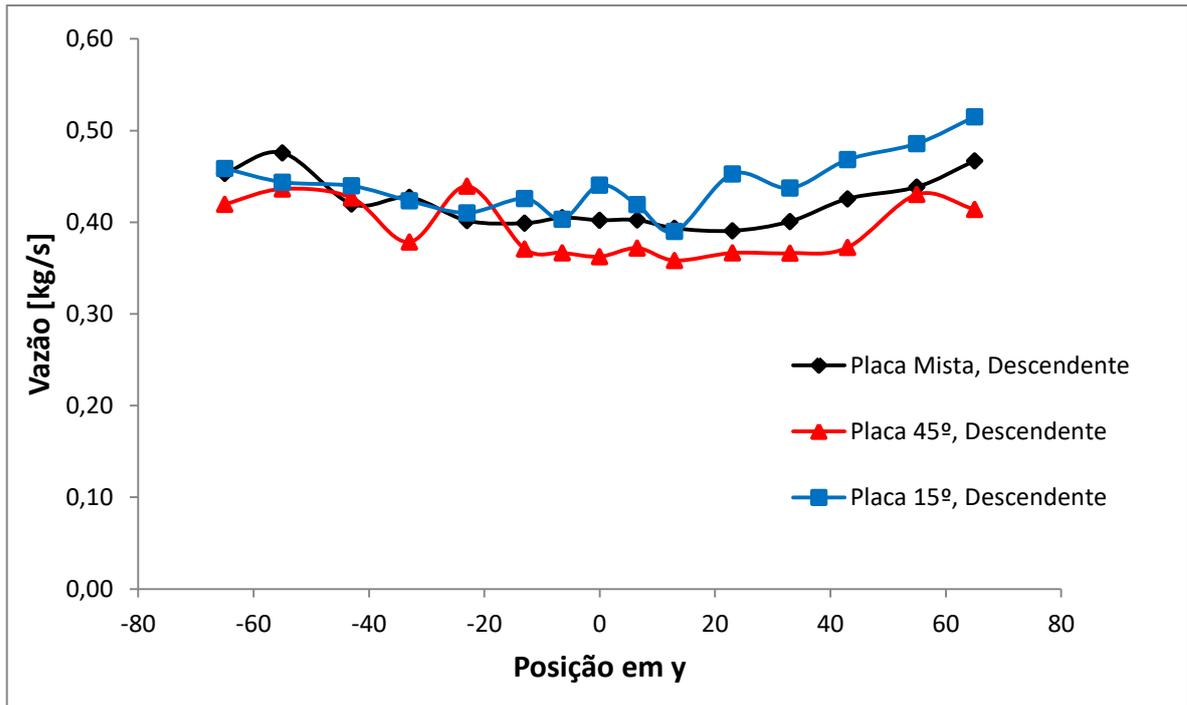
Tabela 5 – Áreas transversais ao escoamento.

<b>y</b> [mm]	<b>Mixed</b> [mm <sup>2</sup> ]	<b>45°</b> [mm <sup>2</sup> ]	<b>15°</b> [mm <sup>2</sup> ]	<b>Correção</b> [mm <sup>2</sup> ]
65	498,80	501,81	496,61	66,97
55	522,46	530,72	518,69	68,75
43	530,97	531,90	535,27	70,79
33	540,70	540,93	535,77	71,30
23	541,85	556,13	533,97	73,34
13	545,14	556,16	540,34	74,36
6,5	566,08	570,70	559,66	74,61
0	567,37	556,12	585,23	75,12
-6,5	566,08	570,70	559,66	74,61
-13	545,14	556,16	540,34	74,36
-23	541,85	556,13	533,97	73,34
-33	540,70	540,93	535,77	71,30
-43	530,97	531,90	535,27	70,79
-55	522,46	530,72	518,69	68,75
-65	498,80	501,81	496,61	66,97
<b>Média Geral</b>	<b>537,29</b>	<b>542,19</b>	<b>535,06</b>	<b>71,69</b>
<b>Área Total</b>	<b>608,98</b>	<b>613,88</b>	<b>606,75</b>	

Fonte: Autor (2018).

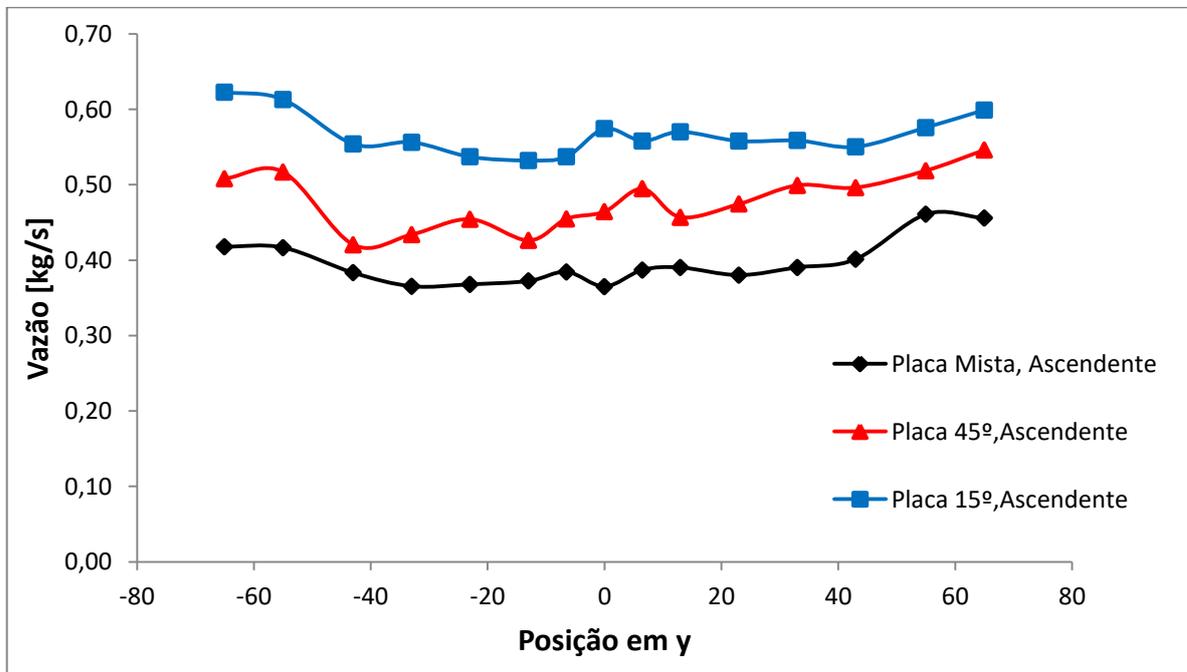
Com o objetivo de verificar a conservação da massa ao longo do canal, é comparada a vazão informada pelo Coriolis (0,51 kg/s) com a vazão calculada pelo método PTV em algumas seções transversais nas Figuras 28 (escoamento descendente) e 29 (escoamento ascendente).

Figura 28 - Vazão mássica, escoamento descendente.



Fonte: Autor (2018).

Figura 29 - Vazão mássica, escoamento ascendente

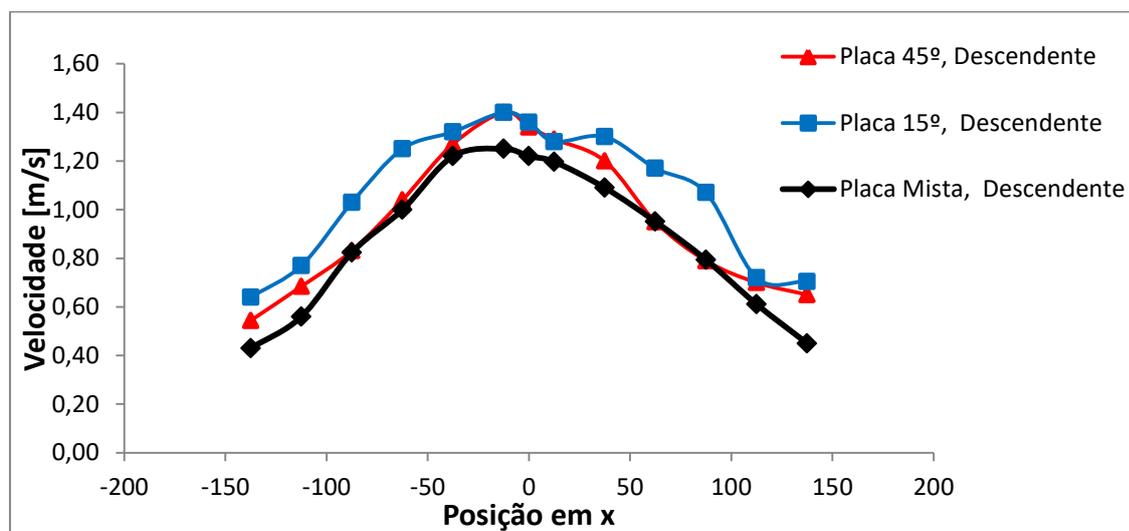


Fonte: Autor (2018).

Como pode ser observado nas figuras 28 e 29, nota-se que valores entre 0,4 e 0,6 kg/s foram obtidos. Desvios da ordem de +/- 20% em relação ao valor informado pelo medidor Coriolis; equipamento com precisão elevada.

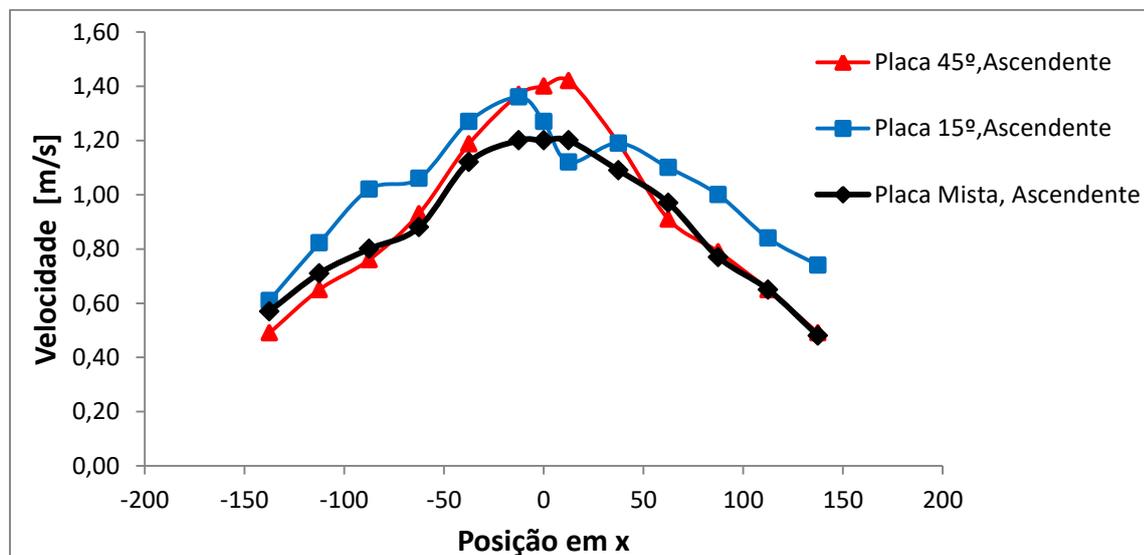
Nas figuras 30 e 31, é apresentado o perfil de velocidade média para a região central ( $y=0$ ) do canal para os casos apresentados .

Figura 30 – Perfil de velocidade média para a região central ( $y=0$ ) do canal em escoamentos descendentes.



Fonte: Autor (2018).

Figura 31 - Perfil de velocidade média para a região central ( $y=0$ ) do canal em escoamentos ascendentes.



Fonte: Autor (2018).

Como pode ser observado nas figuras 30 e 31, para ambas as direções do escoamento, a velocidade do fluido é menor nas extremidades das placas e se eleva na região central das placas.

## 5 CONCLUSÃO

É possível concluir que a técnica experimental Particle Tracking Velocimetry - PTV é uma ferramenta capaz de quantificar e caracterizar escoamentos em geometrias complexas.

Para a geometria de canal de PSHE analisado, foi possível quantificar o campo médio de velocidades no canal. O escoamento radial na entrada do bocal é “bem-comportado”; entrando no canal com poucas perturbações. O escoamento radial na saída do bocal é altamente turbulento, caracterizado por recirculações e um par de vórtices. A velocidade média do fluido é maior na região central da placa. Baixas velocidades são observadas nas extremidades do canal.

Quantificou-se a perda de carga em função da vazão e do afastamento entre placas. Quanto menor o ângulo de Chevron (em relação ao eixo horizontal), maior será a perda de carga.

Na partida desses equipamentos (*startup*), foi constatado que zonas de ar ou bolhas podem existir a baixas vazões de líquido. Foi constatado também que, caso não exista restrição ou rigidez suficiente nas placas, pode ocorrer afastamento entre placas, modificando a perda de carga e os coeficientes de transferência de calor.

### 5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Seria interessante analisar escoamentos bifásicos ou trifásicos na geometria em questão através da bancada multifásica. São condições que podem ocorrer na indústria de óleo e gás.

## REFERÊNCIAS

KAKAÇ, T. S., LIU, H., PRAMUANJAROENKIJ, A. **Heat exchanger: selection, rating and thermal design**. 3.Ed. Boca Raton: Crc, 2012.

FREIRE, L. O., & ALVES DE ANDRADE, D. **On applicability of plate and shell heat exchangers for steam generation in naval PWR**. Nuclear Engineering and Design 280 (2014): 619-627.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Heat and mass transfer**. New York: Mcgraw-Hill, 2015.

VAHTERUS. **Plate & Shell Heat Exchanger**. Disponível em: <<https://vahterus.com/products/>>. Acesso em: 14 de Novembro. de 2018.

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

Walpot, R. J. E. **“3D particle tracking velocimetry and statistical analysis of turbulent pipe flow Eindhoven”**: Technische Universiteit Eindhoven (2007).

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

Villela, Marcos José Rei. **Análise do Comportamento da Temperatura em Sistemas de Produção de Petróleo: Comparação entre Completação Seca e Molhada**. Rio de Janeiro, 2004. 152p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

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

Nikon. **Lentes e Câmeras**. Disponível em:

< <https://imaging.nikon.com/lineup/lens/f-mount/>>. Acesso em: 19 Nov. 2018.

H. G. Maas, A. Gruen, D. Papantoniou. **Particle tracking velocimetry in three-dimensional flows**. Swiss Federal Institute of Technology. 20 January 1993.

H. P. Bakewell and J. Lumley: 1967, "**Viscous sublayer and adjacent wall region in turbulent pipe flow**". *Physics of Fluids* 10(9), 1880-1889.

J. O. Hinze: 1975, *Turbulence*. McGraw-Hill.

R. Volk, E. Calzavarini, E. Lévêque, J.-F. Pinton: "**Dynamics of inertial particles in a turbulent von Kármán flow**", *J. Fluid. Mech.* 668, 223-235 (2011).

R. Clift, K. J. R. Grace and M. E. Weber: 1978, "**Bubbles, drops and particles**". New York: Academic Press.

Volker Grabenstein. **Experimental investigation of the flow pattern, pressure drop and void fraction of two-phase flow in the corrugated gap of a plate heat exchanger**; Institute of Thermodynamics, Gottfried Wilhelm Leibniz University Hannover 2017.

Goes Oliveira, J. L. (2012). **3D-PTV of particle-laden turbulent pipe flows** Eindhoven: Technische Universiteit.

O.P. Arsenyeva, L.L. Tovazhnyanskyy, P.O. Kapustenko, G.L. Khavin, A.P. Yuzbashyan, P.Y. Arsenyev, Two Types of Welded. **Plate Heat Exchangers for Efficient Heat Recovery in Industry, Applied Thermal Engineering** (2016).

Henry P. Bakewell, and John L. Lumley; **Viscous Sublayer and Adjacent Wall Region in Turbulent Pipe Flow**. The Pennsylvania State University 1967.

Luciano Ondir Freire\*, Delvonei Alves de Andrade; On applicability of plate and shell heat exchangers for steamgeneration in naval PWR, IPEN-CNEN/ SP 2014.

H. -E. Albrecht, M. Borys, N. Damaschke, and C. Tropea: **Laser Doppler and phase Doppler measurement techniques**. Springer-Verlag 2003.