

## DETECÇÃO DA VELOCIDADE DAS ONDULAÇÕES DURANTE O PADRÃO DE ESCOAMENTO ESTRATIFICADO ONDULADO

Ana Luiza Guerreschi Kohlmann, [luiza.ana.gk@usp.br](mailto:luiza.ana.gk@usp.br)  
Debora Carneiro Moreira, [dcmoreira@usp.br](mailto:dcmoreira@usp.br)  
Tiago Augusto Moreira, [tmoreira@wisc.edu](mailto:tmoreira@wisc.edu)  
Gherhardt Ribatski, [ribatski@sc.usp.br](mailto:ribatski@sc.usp.br)

Grupo de Pesquisa em Transferência de Calor da EESC - USP, Av. Trab. São Carlense, 400 - Parque Arnold  
Schmidt, São Carlos - SP

**Resumo.** Em escoamentos vapor-líquido, a distribuição das fases ao longo da seção transversal varia de acordo com as condições operacionais. Tais distribuições apresentam geometrias características, denominadas de padrões de escoamento. Entre esses padrões pode-se mencionar o escoamento estratificado ondulado, o qual se caracteriza pela segregação das fases devido aos efeitos gravitacionais, com o líquido escoando na região inferior e o vapor na região superior do duto. Neste padrão, a interface líquido/vapor apresenta ondulações, cuja velocidade é relevante na transferência de calor, perda de pressão e na transição para outros padrões. Desta forma, o presente trabalho envolve a detecção da velocidade das ondulações interfaciais durante o escoamento estratificado ondulado observado em experimentos de condensação convectiva com os fluidos R600a, R290, R1270 e R134a. Imagens do escoamento obtidas com uma câmera de alta velocidade com taxa de aquisição de 25000 quadros/s foram analisadas por meio de códigos implementados em MatLab, possibilitando a detecção da interface líquido/vapor e a observação da sua geometria. Empregou-se o método da correlação cruzada na análise das imagens e obtenção da velocidade das ondulações para diferentes condições de título de vapor e velocidade mássica.

**Palavras chave:** Escoamento Bifásico; Escoamento Estratificado Ondulado; Ondulações Interfaciais; Velocidade de Onda.

**Abstract.** In vapor-liquid flows, the phase distribution along the cross section varies according to the operational conditions. Such distribution presents typical geometries, named in literature as flow patterns. The stratified-wavy is among the flow patterns in horizontal ducts and it is characterized by the segregation of the liquid and vapor phases due to the gravitational effects, with the liquid flowing in the lower region and the vapor in the upper region of the duct. Moreover, the wave speed at the liquid/vapor interface affects the heat transfer coefficient, the pressure drop and the transition from stratified-wavy to other flow patterns. In this context, the present work concerns the detection of the interfacial waves speed during the stratified-wavy flow, observed in convective condensation experiments with fluids R600a, R290, R1270 and R134a. Flow images obtained with a high-speed camera with an acquisition rate of 25000 frames/s were analyzed using codes implemented in MatLab, enabling the detection of the liquid/vapor interface and the observation of its topology. The cross-correlation method was employed on the analysis of the images and wave velocities were obtained under different conditions of vapor quality and mass velocity.

**Keywords:** Two-Phase Flow; Stratified Wavy Flow; Interfacial Waves; Wave Speed

### 1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por redução de custos e de impactos ambientais no desenvolvimento de novas tecnologias direciona esforços da indústria e da academia para o desenvolvimento de trocadores de calor de alto desempenho, que sejam compactos e com elevada eficiência. Assim, escoamentos com mudança de fase como ebulição e condensação convectivas têm sido amplamente estudados, visto que a troca de calor latente está diretamente associada a elevadas taxas de transferência de calor e reduzidos gradientes de temperatura. Neste contexto, destaca-se que a potência de bombeamento requerida e o calor transferido em escoamentos com mudança de fase dependem significativamente das condições operacionais as quais determinam a distribuição das fases.

Escoamentos bifásicos são classificados de acordo com a topologia característica de distribuição das fases (Taitel e Dukler, 1976; Collier e Thome, 1994). Diferentes padrões se estabelecem dependendo das propriedades dos fluidos, condições experimentais, geometria do duto e orientação do escoamento (Hamersma e Hart, 1987), de modo que relações

diretas entre esses fatores, os padrões de escoamento, a perda de pressão e a transferência de calor são observadas (Thome, 2008). Neste contexto, métodos para previsão desses padrões foram desenvolvidos e, dentre eles, destaca-se para a condensação em dutos horizontais o método de El Hajal et al. (2003), o qual se baseia em relações geométricas do escoamento, incluindo o ajuste de parâmetros empíricos por meio de um banco de dados provenientes da literatura. Esse método permite o levantamento de diagramas, denominados na literatura como mapas de padrões de escoamentos que, de acordo com as condições experimentais, apresentam linhas caracterizando as transições entre os padrões. De maneira geral, os métodos mais recentes são modificações do modelo fenomenológico pioneiramente desenvolvido por Taitel e Dukler (1976), o qual se baseia em mecanismos físicos associados às transições.

Dentre os modos de escoamento destaca-se o padrão estratificado ondulado, que ocorre para condições amplas de título de vapor, de acordo com os mapas de El Hajal et al. (2003). Segundo Collier e Thome (1994), o padrão de escoamento estratificado é caracterizado pela separação das fases líquido e vapor devido a efeitos gravitacionais, com o líquido escoando na região inferior e o vapor na região superior do canal. Como o volume específico da fase vapor é superior, ela escoar em velocidade superior à do líquido, gerando ondulações interfaciais cujas características encontram-se associadas à tensão superficial, efeitos de empuxo e a diferença de velocidade entre as fases (Wojtan et al., 2005). Em termos de projeto de trocadores, deve-se destacar que as características destas ondulações se encontram associadas à taxa de transferência de calor e à perda de pressão, conforme identificado por Al-Wahaibi e Angeli (2011).

Ao contrário do padrão anular, para o qual há um número relevante de estudos caracterizando as ondulações interfaciais, no caso do padrão estratificado ondulado estes são raros. Neste contexto, o presente estudo visa preencher tal lacuna da literatura, tendo como foco a detecção da velocidade de ondulações interfaciais para a condensação convectiva dos fluidos propano (R290), isobutano (R600a), propileno (R1270) e R134a. Para isso, foi desenvolvido um código em MatLab (2020) capaz de detectar a interface líquido/vapor e avaliar a velocidade média das ondulações a partir de imagens dos escoamentos, levantadas por meio de uma câmera de alta velocidade. Os resultados levantados por meio deste código são analisados e os efeitos do fluido, título de vapor e velocidade mássica na velocidade das ondulações caracterizados.

## 2. MÉTODOS

A caracterização das ondulações interfaciais deu-se a partir de imagens do escoamento bifásico levantadas para condições de condensação dos fluidos R290, R600a, R1270 e R134a durante o doutoramento de Moreira (2021) para um duto com diâmetro interno de 9,43 mm e externo de 12,89 mm. Estas imagens foram gravadas por meio do programa comercial Phantom Camera Control, desenvolvido para ser utilizado com a câmera de alta velocidade Phantom v2012 com frequência de aquisição de 25000 quadros/s e resolução de 1280x720 pixels.

Códigos foram desenvolvidos em MatLab (2015) e segregados em subprogramas, acessados a partir de um programa principal, o qual é responsável por acessar cada sequência de imagens e aplicar as rotinas dos subprogramas em seu processamento. A primeira imagem de cada uma dessas sequências é utilizada como referência para as demais. Assim, nessa imagem são marcados manualmente os limites radiais externos da tubulação. A dimensão compreendida por estas extremidades é empregada como base para os cortes das imagens e para a conversão de pixel para milímetro. Como o valor do diâmetro externo é fixo e conhecido, aplica-se uma razão de proporcionalidade linear, dada pela equação a seguir:

$$\text{Dimensão de um Pixel [mm]} = \frac{\text{Diâmetro do duto [mm]}}{\text{Número de pixels entre os pontos marcados}} \quad (1)$$

Cada sequência de imagens foi obtida para condições fixas de operação da câmera, isto é: foco, distância e iluminação. Desta forma, é possível utilizar a mesma relação de conversão e corte para todo o grupo de imagens.

### 2.1 Tratamento das Imagens

Uma vez realizado o corte das imagens segundo os limites radiais do duto, estas são tratadas por meio de uma sequência de filtros disponíveis no MatLab (2020). Os filtros aplicados tem como objetivo evidenciar os contrastes das grandes estruturas e reduzir efeitos relacionados às diferenças de iluminação. Neste tratamento as imagens são também submetidas a um processo de binarização, que consiste em uma segmentação das cores da imagem, de acordo com um valor limiar, de forma que ela, inicialmente dada segundo uma escala de tons cinza, passe a apresentar pixels apenas em branco e preto. A Fig. 1 ilustra uma comparação da imagem original, já cortada, com a imagem tratada por filtros e binarizada.

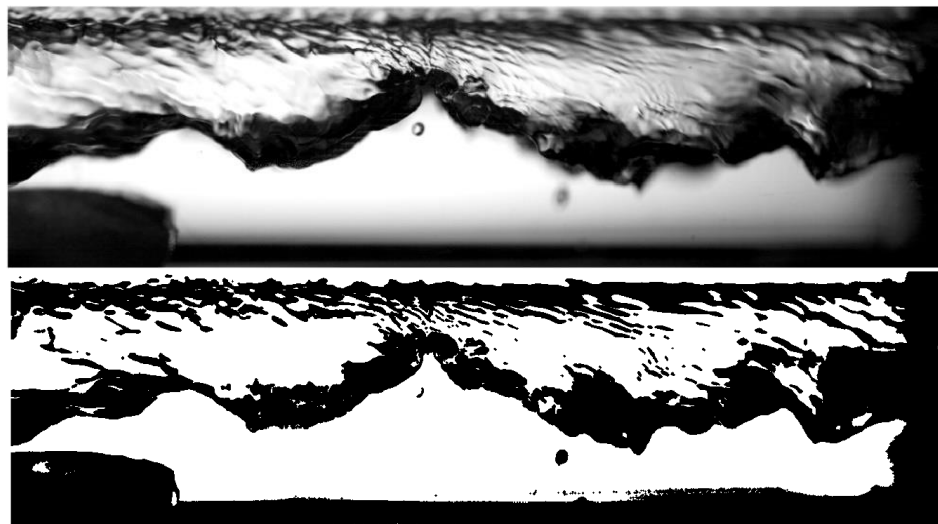


Figura 1: Comparação entre a imagem do escoamento inicial e a imagem tratada

## 2.2 Correção da Leitura das Imagens

As imagens capturadas do escoamento apresentam dimensões verticais distorcidas devido a efeitos de refração causados pela mudança do meio de propagação da luz e pela curvatura do tubo. Buscou-se corrigir tais distorções por meio de metodologia similar à empregada por Ursenbacher et al. (2003) e Kanizawa (2014). Dessa forma, introduziu-se no interior do duto, em seu plano central perpendicular ao seu eixo axial, uma escala milimetrada, adotando-se a distância conhecida de um milímetro entre as linhas horizontais desta escala como referência para a correção das dimensões registradas na imagem. Assim, por meio do programa comercial MatLab (2020) e tendo a conversão de pixel para milímetro da imagem, obteve-se um vetor de conversão. Nota-se nesse vetor de conversão que quanto mais próximo do centro do tubo, menor a distorção da imagem, conforme esperado.

A partir do vetor de conversão ajustou-se uma função por meio do comando *polyfit* do MatLab (2020), o qual utiliza o método dos mínimos quadrados para ajustar um polinômio, de acordo com o grau selecionado. Dessa forma, quando um valor de interface é registrado, ele passa por esse polinômio que resulta em um fator, esse fator é utilizado para dividir o valor da interface que foi medida, encontrando o valor real dela, conforme a equação a seguir:

$$Valor\ Real = \frac{Valor\ Medido}{Fator} \quad (2)$$

## 2.3 Determinação da Velocidade de Onda

A velocidade das ondas interfaciais foi determinada a partir do método de correlação cruzada, que é uma medida de similaridade entre dois sinais em função de um atraso em um deles (Bendat e Piersol, 2000). De forma prática, um dos sinais é considerado estático enquanto o outro se desloca sobre ele. Dessa forma, o momento em que a correlação é máxima, é aquele de maior sobreposição entre os sinais.

No MatLab (2020) a correlação cruzada é dada pela função *xcorr* aplicada, neste estudo, ao sinal da espessura instantânea do filme líquido, avaliada em duas posições distintas no sentido axial do duto para as imagens sequenciais de um determinado grupo. O procedimento para detectar a interface compõe-se de uma série de laços de repetição responsáveis por percorrer a imagem na região de interesse, a qual é selecionada manualmente na primeira imagem de cada grupo, servindo para as demais. Sendo  $x$  a coordenada horizontal, que é previamente informada nos códigos, e  $y$  a coordenada vertical, a leitura se inicia em  $Y_{min}$  – extremidade inferior da região de interesse. O pixel inicial é branco e a leitura deve ascender em  $y$ . O processo continua até que se detecte um pixel preto e, assim, a interface é detectada, definida como a transição ascendente de pixel branco para preto.

O valor máximo da correlação cruzada entre esses dois sinais gera um ponto de duas coordenadas, sendo o parâmetro  $y$  usado para identificação do valor máximo e  $x$  representa o número de imagens necessárias para que a ondulação se desloque de um ponto de leitura do sinal até o outro. Obtendo esse valor e conhecendo a frequência de aquisição das imagens é possível por meio da equação abaixo determinar o tempo de deslocamento:

$$Tempo [s] = \frac{Máximo\ valor\ da\ correlação\ cruzada\ em\ x}{Frequência\ de\ Aquisição\ das\ Imagens [1/s]} \quad (3)$$

e por fim, conhecendo a distância entre os sinais é possível calcular a velocidade da ondulação:

$$Velocidade [m/s] = \frac{Distância\ entre\ os\ pontos\ escolhidos [m]}{Tempo [s]} \quad (4)$$

Buscando validar o método empregado, avaliou-se a velocidade das ondas, suas amplitudes e a convergência dos resultados considerando localizações distintas para a avaliação da espessura do filme líquido e diferentes distâncias entre estes locais ilustrados na Fig. 2. Esta avaliação envolveu uma sequência de imagens do escoamento para o fluido R600a, com velocidade mássica de  $100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , título de vapor de 0,13 e temperatura de saturação de  $35^\circ\text{C}$ . Como a distância entre os pontos era de 100 pixels, o ponto “A” foi definido como a posição inicial.

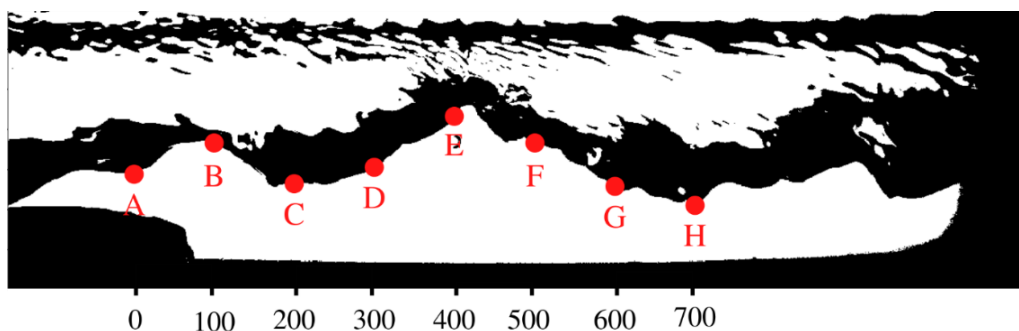


Figura 2: Posições ao longo da imagem em que foram levantadas a espessura do filme

Notou-se discrepâncias entre as leituras do perfil da interface para as diferentes posições consideradas, de maneira geral, associadas a ruídos. No caso da posição “A”, as diferenças observadas em relação às demais foram superiores, optando-se pela não utilização destes dados. Efeitos de ruídos causados por bolhas ou descontinuidades no perfil foram mitigados por meio da aplicação de dois métodos ao sinal. O primeiro foi a utilização de um laço de repetição, responsável por comparar a espessura do filme, ou seja, a amplitude da ondulação, medida por duas imagens consecutivas. Caso a diferença entre os dois valores fosse superior a um limite preestabelecido, o valor anterior é adotado como resultado, caso contrário mantem-se o valor atual. O outro método consistiu na utilização do filtro *Butterworth*, dado pela função *butter* no MatLab (2020), responsável por suavizar as curvas. A Fig. 3 ilustra uma comparação entre um sinal original, na primeira ilustração, e os sinais modificados, na segunda ilustração. Nesta última, em vermelho encontra-se o resultado com a aplicação do primeiro método, e em azul o resultado final, após a aplicação do filtro.

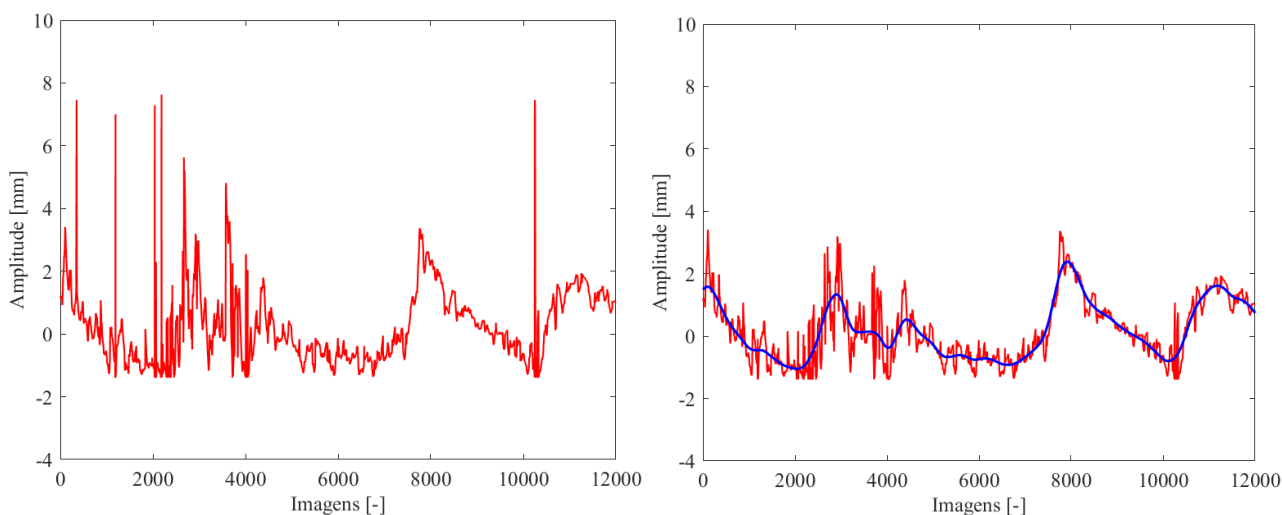


Figura 3: Comparação entre o sinal da espessura de filme original (primeiro gráfico em vermelho), este sinal após a aplicação do primeiro método (segundo gráfico em vermelho) e após o filtro (em azul)

Após a aplicação dos métodos ao sinal, a velocidade foi avaliada por meio da técnica de correlação cruzada para as seguintes combinações de locais de levantamento da espessura do filme líquido segregados segundo a distância entre eles: 100 pixels (BC, CD, DE, EF, FG, GH), 200 pixels (BD, CE, DF, EG, FH), 300 pixels (BE, CF, DG, EH) e 400 pixels (BF, CG, DH). Estes resultados encontram-se ilustrados na Fig. 4, na qual o eixo y fornece a velocidade média das ondas interfaciais e o eixo x a distância em pixels entre o primeiro local de avaliação da espessura do filme líquido e a cota nula. Nota-se que para uma posição inicial de avaliação da espessura de filme superior a 300 pixels e uma distância

entre os locais de avaliação igual a 200 pixels os resultados para a velocidade convergem para um único valor, tornando adequado o emprego de tais condições para a avaliação da velocidade de deslocamento das ondulações, compreendendo os pares de pontos CF e DG segundo a Fig. 1.

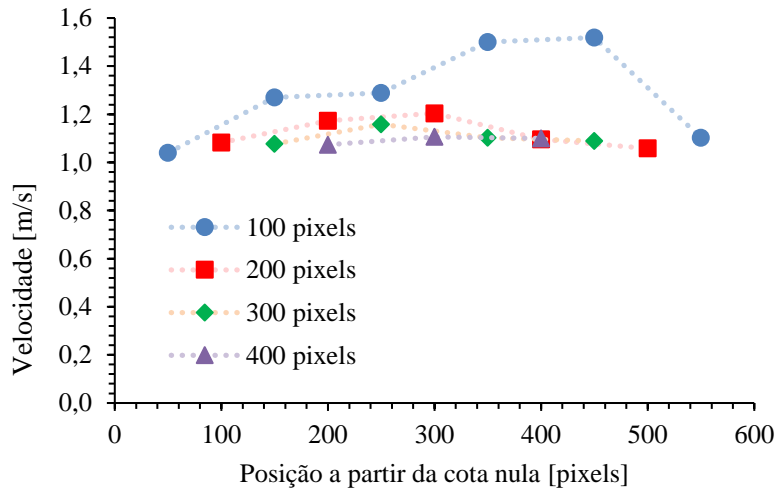


Figura 4: Efeito da distância entre os locais de avaliação da espessura e da primeira posição de captura do sinal no resultado da velocidade das ondulações

Um procedimento similar ao empregado por Arcanjo et al. (2010) foi utilizado para a validação desta metodologia. Este consistiu em levantar a partir da análise de sequência de imagens os deslocamentos axiais de uma crista de onda (DL) e um vale (DL) para um número de imagens ( $N_f$ ) correspondentes, com a velocidade sendo dada pela seguinte relação:

$$Velocidade [m/s] = \frac{DL [m] * Frequência de aquisição [1/s]}{N_f [-]} \quad (5)$$

A Fig. 5 ilustra resultados para a velocidade média das ondulações calculadas a partir do método da correlação cruzada para a distância de 400 pixels entre os sinais, o valor médio de velocidade de crista e o valor médio da velocidade de vale, considerando 5 amostras nestes dois últimos. Pode se perceber que a velocidade das ondulações avaliada segundo o método da correlação cruzada apresenta valor intermediário entre a velocidade dos picos e dos vales das ondulações. Tal comportamento valida o método utilizado e é corroborado pelo estudo de Jayanti e Hewitt (1997).

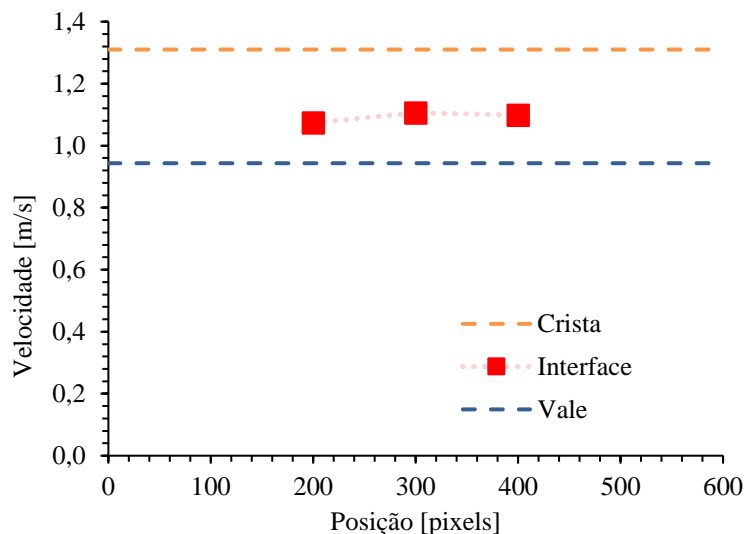


Figura 5: Comparação entre a velocidade da interface e a velocidade da crista das ondulações

### 3. RESULTADOS

A Fig. 6 ilustra resultados das velocidades das ondulações para a condensação convectiva de propano (R290), isobutano (R600a), propileno (R1270) e R134a para condições distintas de velocidade mássica ( $G$ ) e título de vapor ( $x$ ). De maneira geral, em títulos de vapor reduzidos a velocidade das ondulações se eleva com o aumento do título de vapor (flechas azuis) e com a elevação da velocidade mássica (flechas vermelhas). No caso de títulos de vapor superiores a 0,3 a velocidade das ondulações parece tender para um valor próximo a 0,8 m/s. No entanto, não é possível assegurar este comportamento assintótico pois o número de dados disponíveis não é suficiente. Ademais, para títulos de vapor próximos e uma mesma velocidade mássica, o isobutano apresenta velocidades superiores ao propileno, enquanto para condições experimentais semelhantes, o R134a apresenta velocidades inferiores ao propileno (flechas verdes).

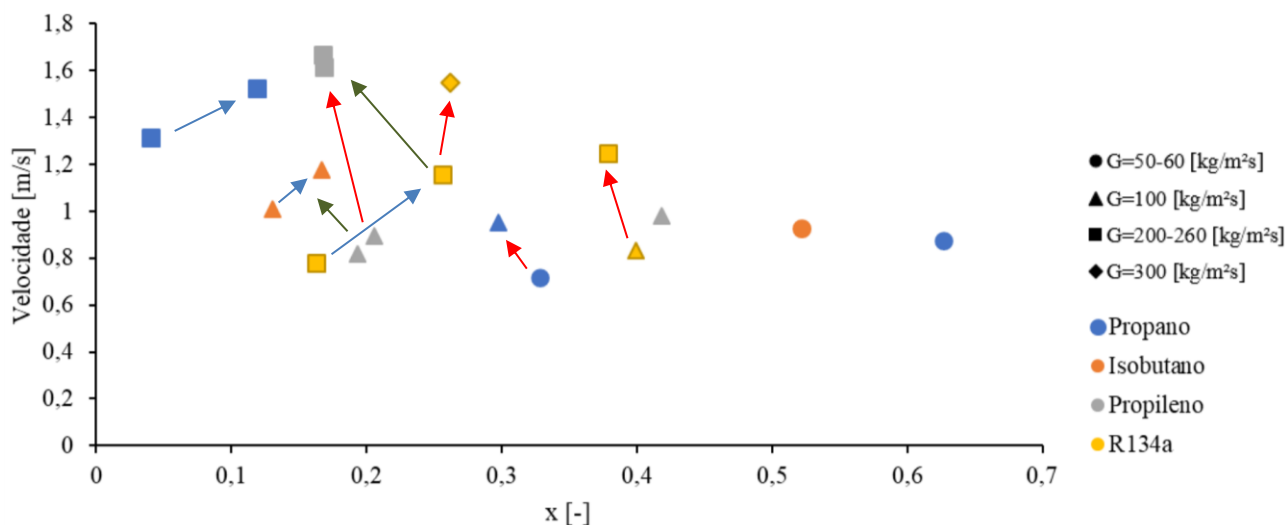


Figura 6: Ilustração do comportamento da velocidade das ondulações com a variação dos parâmetros experimentais

O aumento da velocidade das ondulações em títulos de vapor reduzidos encontra-se associado à maior velocidade superficial da fase vapor, arrastando de forma significativa a interface em condições que a espessura de líquido é elevada. O incremento da velocidade mássica implica na elevação da velocidade superficial da mistura bifásica e consequentemente das ondulações. Finalmente, ao observar os volumes específicos da fase vapor dos fluidos, listados na Tab. 1, pode-se correlacionar os aumentos de velocidade interfacial indicados pelas flechas verdes na Fig. 6 com o acréscimo de volume específico da fase vapor.

Tabela 1. Volume específico da fase vapor para cada fluido analisado

Fluido	Volume específico [m <sup>3</sup> /kg]
Propano	0,0376
Isobutano	0,0834
Propileno	0,0318
R134a	0,0230

### 4. CONCLUSÃO

A partir deste estudo é possível extrair as seguintes conclusões: (i) o procedimento de tratamento de imagens e o método das correlações cruzadas fornecem estimativas satisfatórias da velocidade média das ondulações; (ii) a velocidade média das ondulações se eleva com o incremento do título de vapor e da velocidade mássica em títulos de vapor inferiores a 0,3; (iii) em títulos de vapor reduzidos o acréscimo no valor do volume específico da fase vapor de cada fluido resulta em acréscimo de velocidade; (iv) um comportamento assintótico das ondulações parece ocorrer em títulos de vapor superiores a 0,3 para as condições avaliadas neste estudo, contudo mais dados seriam necessários para confirmar a hipótese.

### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo financiamento da pesquisa através das bolsas de estudo sob os contratos números 2015/24834-3, 2016/09509-1, 2016/16849-3 e 2021/03634-7.

## 6. REFERÊNCIAS

- Al-Wahaibi, T. e Angelib, P. Experimental study on interfacial waves in stratified horizontal oil water flow. **International Journal of Multiphase Flow**, p. 930-940, out. 2011.
- Arcanjo, A., Tibiriça, C. e Ribatski, G. Evaluation of flow patterns and elongated bubble characteristics during the flow boiling of halocarbon refrigerants in a micro-scale channel. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 34, p. 766-775, 2010.
- Bendat, J. e Piersol, A. **Random data analysis and measurement procedures**. New York: John Wiley & Sons, 2000
- Collier, J. e Thome, J. **Convective boiling and condensation**. Third Edition. Clarendon Press: Oxford, 1994.
- El Hajal, J., Thome, J. e Cavallini, A. Condensation in horizontal tubes, part 1: twophase flow pattern map. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, p. 349-363, jun. 2003.
- Hammersma, P. e Hart, J. A pressure drop correlation for gas/liquid pipe flow with a small liquid holdup. **Chemical Engineering Science**, p. 1187-1196, 1987.
- Jayanti, S. e Hewitt, G. Hydrodynamics and heat transfer in wavy annular gas-liquid flow: A computational fluid dynamics study. **International Journal of Heat Mass Transfer**, p. 2445-2460. 1997
- Kanizawa, F. **Estudo teórico e experimental sobre padrões de escoamento, fração de vazio e perda de pressão durante escoamentos bifásico água-ar cruzado ascendente externo a banco de tubos**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, [S. l.], 2014.
- Math Works, Inc. **MATLAB**. Versão 2020.
- Moreira, T.A. **A two-phase flow constructive parameters characterization, and heat transfer performance of hydrocarbons and their mixtures during condensation**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2021
- Ursenbacher, T., Wojtan, L. e Thome, J. Interfacial measurements in stratified types of flow. Part I: New optical measurement technique and dry angle measurements. **International Journal of Multiphase Flow**, p. 107-224, nov. 2003.
- Wojtan, L., Ursenbacher, T. e Thome, J. R. Investigation of flow boiling in horizontal tubes: Part I A new diabatic two-phase flow pattern map. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, p. 2955-2969, 14 abr. 2005.
- Taitel, Y. e Dukler, A. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. **AIChE Journal**, p. 47-55, jan. 1976.
- Thome, J. **Engineering Data Book III**. EPFL: Switzerland, 2008.

## 7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.