

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ANÁLISE NUMÉRICA DO ESCOAMENTO ASCENDENTE DE UM FILME DE LÍQUIDO SOB A AÇÃO DOS CAMPOS CENTRÍFUGO E GRAVITACIONAL

Henrique Krainer Eidt, hkeidt@gmail.com¹

Carolina Cimarelli Rodrigues, carolcimarelli@gmail.com²

Paulo Henrique Dias dos Santos, psantos@utfpr.edu.br³

Rigoberto Eleazar Melgarejo Morales, rmorales@utfpr.edu.br⁴

^{1, 2, 3, 4} Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Avenida Sete de Setembro 3165, Rebouças, CEP: 80230-901, Curitiba, Paraná.

Resumo: *Escoamentos com superfície livre compõem uma classe importante na mecânica dos fluidos. Um dos tipos desse escoamento é denominado como filme de líquido. No presente trabalho é realizada uma análise do desenvolvimento de filme de líquido em um escoamento ascendente sob a ação dos campos centrífugo e gravitacional. Neste trabalho é estudada a dinâmica de um escoamento bifásico líquido-gás com auxílio de simulações numéricas tridimensionais e transientes. Para a modelagem do escoamento é utilizado o modelo de dois fluidos euleriano-euleriano não homogêneo, junto com o modelo de turbulência SST (Shear Stress Transport) e o esquema compressivo para a captura da interface líquido-gás. Na modelagem numérica será utilizado o método dos volumes finitos baseados em elementos finitos através software ANSYS-CFX 15.0.*

Palavras-chave: *análise numérica, filme de líquido ascendente, campos centrífugo e gravitacional*

1. INTRODUÇÃO

Escoamentos com superfície livre compõem uma classe importante de escoamentos bifásicos na área da mecânica dos fluidos e são caracterizados por ter uma interface que separa a fase líquida da fase gasosa.

Dentre os escoamentos com superfície livre, a ocorrência de uma película líquida escoando por uma superfície sólida vertical ou horizontal recebe o nome de filme de líquido. Esses tipos de escoamentos estão presentes em diversas aplicações na engenharia, como por exemplo: sistemas de refrigeração em reatores nucleares, lubrificação de equipamentos em mancais, sistemas de secagem e de dessalinização e em câmaras ciclônicas de separadores bifásicos líquido-gás (Malamatenios, 1994).

Na indústria de petróleo, os separadores bifásicos de líquido-gás, são projetados com a finalidade de aproveitar a ação das forças centrífuga e gravitacional, a fim de promover a segregação das fases e permitir o uso de sistemas de bombeamento centrífugo como técnica de elevação de petróleo. Existem diversos tipos de separadores utilizados em cenários de produção de petróleo em águas profundas, como por exemplo, os separadores bifásicos líquido-gás do tipo VASPS e GLCC (Ninahuanca, 2013).

Entretanto, a instalação e manutenção desses separadores são dificultadas pela grande dimensão desse equipamento. A fim de contornar esse problema propõem-se um sistema de distribuição prévio visando diminuir a geometria do separador, mantendo a vazão e eficiência de separação. Para não alterar esses parâmetros se faz necessário à implementação de mais separadores com dimensões reduzidas. A divisão do escoamento ocorre através do distribuidor, que no seu interior, possui uma câmara ciclônica e o escoamento nela é do padrão de filme de líquido ascendente. O filme de líquido se forma devido ao campo centrífugo criado pelo posicionamento tangencial das entradas e da curvatura da câmara ciclônica.

Alguns autores realizaram estudos sobre o comportamento e desenvolvimento de um escoamento de filme de líquido descendente sob o efeito dos campos centrífugos e gravitacional. Morandin (1999) realizou um estudo teórico, numérico e experimental no interior da câmara ciclônica do separador VASPS e determinou que os números adimensionais, Reynolds e Froude, regem o comportamento do filme de líquido. Esses números são apresentados a seguir:

$$Re_{\delta f} = \frac{Q_L}{2\pi R_0 v} \quad (1)$$

$$Fr_{Qf}^2 = \frac{\left(\frac{Q_L}{R_0^2}\right)^2}{gR_0} \quad (2)$$

onde Q_L é a vazão na entrada do líquido e R_0 é o raio da câmara de expansão, g é a gravidade e v é a viscosidade cinemática.

Morandin (1999) demonstrou que quanto maior o número de Froude, melhores serão as condições para a formação de um escoamento simétrico ao longo da seção transversal da câmara de expansão.

Sant'anna (2010) realizou um estudo numérico no interior da câmara de expansão do separador VASPS, validadas com os dados experimentais de Morandin (1999), e concluiu que o comportamento do escoamento de filme de líquido, no interior da câmara de expansão do separador VASPS, independe da presença do gás.

Ninahuanca (2015) realizou um estudo numérico e experimental da caracterização do escoamento de filme de líquido descendente sob o efeito do campo centrífugo e gravitacional na câmara de expansão do separador VASPS, e desenvolveu um modelo matemático. O modelo desenvolvido pelo autor utiliza o conceito de uma linha de corrente média para a análise da espessura e das velocidades do filme de líquido. Tais parâmetros variavam em função dos números adimensionais $Re_{\delta f}$ e Fr_{Qf}^2 .

No presente estudo foi realizada uma análise numérica do comportamento do escoamento ascendente do filme de líquido sob o efeito do campo centrífugo e gravitacional. A relevância desse trabalho é devido à necessidade de uma distribuição equitativa das vazões de líquido e gás que é proporcionada pela uniformidade e estabilidade da espessura do filme de líquido na saída da câmara ciclônica presente no sistema de distribuição. Além disso, não foi encontrado nenhum estudo a respeito do comportamento do escoamento de filme de líquido ascendente. A geometria em que foi realizado o estudo está presente na Figura 1, com duas entradas posicionadas tangencialmente e a saída na parte superior. O comprimento "H" da câmara ciclônica foi variado para verificar a influência deste no comportamento do filme de líquido.

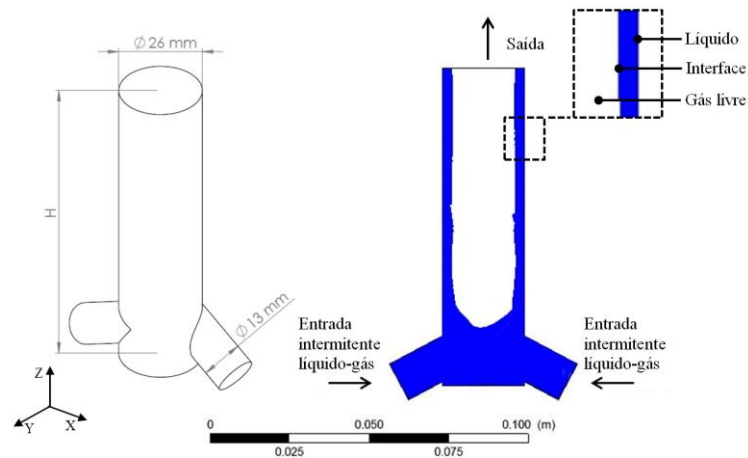


Figura 1. Representação esquemática da geometria utilizada no presente estudo.

2. ESTUDO NUMÉRICO

Uma vez que este trabalho está focado no comportamento do escoamento de filme líquido ascendente, não será realizada a análise referente à fase gasosa do escoamento. Este fenômeno pode ser compreendido como um domínio de líquido e gás em que ambas as fases são contínuas e separadas por uma interface de superfície livre. Este problema pode ser resolvido através da solução das equações da conservação da massa e do balanço da quantidade de movimento para cada fase dentro do domínio, bem como a resolução de uma interface entre elas. O ANSYS CFX foi usado para essa solução.

2.1. Modelagem Matemática

Para simulações de escoamentos bifásicos transientes está disponível no programa ANSYS CFX 15.0 uma abordagem euleriana-euleriana. Este procedimento pressupõe um referencial inercial de referência para cada fase, que

são consideradas como interpenetrantes e contínuas. O método adotado neste trabalho é não homogêneo, ou seja, os campos de velocidade de cada fase são resolvidos e as interações interfaciais entre eles são levados em conta através de termos fontes.

A abordagem não homogênea euleriana-euleriana é obtida utilizando uma função indicadora de fase e um processo de média sobre as equações de transporte local. A finalidade do procedimento é transformar um meio descontínuo com duas fases em dois meios contínuos separados, um para cada fase (Yeoh e Tu, 2009). Negligenciando a transferência de massa interfacial entre as fases e as forças que não são de arrasto, as equações da conservação da massa e do balanço da quantidade de movimento para a fase de "k" pode ser escrita, respectivamente, como:

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \hat{\mathbf{v}}_k) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k \hat{\mathbf{v}}_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \hat{\mathbf{v}}_k \hat{\mathbf{v}}_k) = -\nabla (\alpha_k p_k) + \nabla \cdot [\alpha_k (\boldsymbol{\tau}_k + \boldsymbol{\tau}_k^T)] + \alpha_k \rho_k \mathbf{g}_k + \mathbf{F}_D \quad (4)$$

onde α_k é a fração volumétrica da fase k, ρ_k é a densidade da fase k, $\hat{\mathbf{v}}_k$ é o vetor velocidade médio da fase em relação a massa, $\mathbf{F}_D$ é a força de arrasto por unidade de volume entre as fases, p_k é a pressão, $\mathbf{g}_k$ é o vetor da aceleração da gravidade, $\boldsymbol{\tau}_k$ é o tensor de tensões viscosas e $\boldsymbol{\tau}_k^T$ é o tensor de tensão de Reynolds que resulta das equações médias de Reynolds modelagem de turbulência. O tensor de Reynolds por sua vez, é modelado usando a abordagem para viscosidade turbulenta e o modelo SST (Shear Stress Transport) (Wilcox, 1998).

Uma das desvantagens da abordagem de duas fases euleriana-euleriana no contexto dos escoamentos de superfície livre é que a presença de cada fase no espaço é suavizada, uma vez que as fases são consideradas como interpenetrantes e contínuas. Assim, a interface entre as fases tende a ser muito difusa no espaço, isto é, tem espessura diferente de zero. Uma maneira de determinar a localização da interface líquido-gás é adotar um esquema compressivo de discretização para reduzir a faixa de probabilidade de onde se encontra a interface, que é uma técnica numérica aplicada ao termo de advecção das equações de fração de volume.

A força de interação na interface líquido-gás, $\mathbf{F}_D$, é calculada através do modelo de força de arrasto sendo considerado como uma superfície livre, que pode ser expresso como:

$$\mathbf{F}_D = C_D \rho_{ij} A_{ij} (\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i) |\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i| \quad (5)$$

onde C_D é o coeficiente de arrasto, ρ_{ij} é a densidade da mistura definida como $\rho_{ij} = \alpha_i \rho_i + \alpha_j \rho_j$, os subscritos i e j referem-se a cada fase, e A_{ij} é definido como $A_{ij} = |\nabla \alpha_L|$, onde L indica a fase líquida. Em escoamentos com superfície livre, o coeficiente de arrasto para a força de interação na interface líquido-gás pode ser definido com o valor de $C_D = 0.44$. Este valor foi considerado como uma escolha numericamente estável, como uma forma de modelar artificialmente as fases contínuas como homogêneas.

2.2. Malha Computacional

A Figura 2 apresenta a distribuição dos elementos da malha através do domínio numérico da câmara ciclônica. Elementos tetraédricos e hexaédricos foram usados para criar toda a malha. Um refino na malha em torno da transição das entradas com a câmara e perto das paredes do cilindro foi realizado para fornecer melhor detalhamento da interface de superfície livre. A distância entre essa interface e a parede do cilindro denomina-se espessura do filme de líquido.

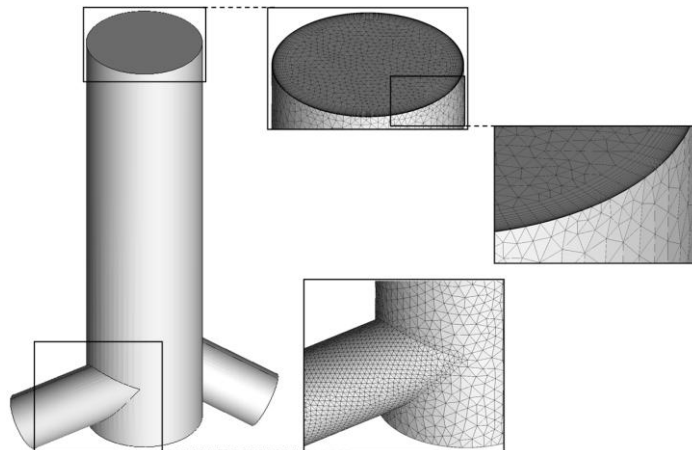


Figura 2. Malha computacional.

A sensibilidade dos resultados no que diz respeito ao número de elementos da malha foi analisada. Para o teste de malha foram criadas quatro malhas com diferentes números de elementos (de 660.000 a 1.320.000) e, a mais refinada foi a de referência. Os resultados do teste de sensibilidade do número de elementos da malha são mostrados na Tabela 1 e Tabela 2. Este teste revelou que a malha fina se diferencia dos resultados da mais fina com erros relativos menores que 7%. Além disso, esse teste também sugere que o uso de uma malha com aproximadamente 1.000.000 pode reproduzir resultados independentes da malha para as variáveis investigadas neste estudo.

Na Tabela 1 está presente a influência da quantidade de elementos na espessura do filme de líquido. A média da espessura foi calculada pela média dos erros relativos referentes à espessura por toda câmara ciclônica. A Linha 1, Linha 2 e Linha 3 são linhas posicionadas próximas a parede para poder realizar as comparações pontuais em três alturas diferentes.

Tabela 1. Teste de malha referente à espessura do filme de líquido.

Malha	Nº de Elementos	Espessura			
		Média	Linha 1	Linha 2	Linha 3
Grossa	660022	5.72%	0.33%	1.36%	0.21%
Média	810041	4.42%	0.77%	0.52%	0.68%
Fina	1014441	4.99%	0.12%	2.00%	0.12%
Mais Fina	1320540	-	-	-	-

A análise da influência da quantidade de elementos na velocidade do escoamento está apresentada na Tabela 2. Foram adotadas as mesmas três linhas utilizadas no estudo da espessura, porém a comparação é sobre as velocidades axial, tangencial e o módulo do vetor da velocidade.

Tabela 2. Teste de malha referente à velocidade do líquido.

Malha	Velocidade Tangencial			Velocidade Axial			Velocidade		
	Linha 1	Linha 2	Linha 3	Linha 1	Linha 2	Linha 3	Linha 1	Linha 2	Linha 3
Grossa	4.63%	10.64%	15.91%	2.08%	4.44%	4.95%	3.10%	6.76%	10.62%
Média	3.05%	6.71%	10.94%	5.52%	3.38%	3.05%	2.95%	3.73%	7.17%
Fina	1.74%	4.14%	6.93%	1.85%	1.17%	5.57%	1.26%	2.14%	6.36%
Mais Fina	-	-	-	-	-	-	-	-	-

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção é analisado o escoamento do filme de líquido ascendente sob o efeito dos campos centrífugo e gravitacional. O escoamento intermitente, pulsando alternadamente líquido e gás, que entra na câmara ciclônica representa um escoamento padrão golfadas. As condições operacionais (velocidades do líquido e do gás) foram obtidas a partir do modelo desenvolvido por Barnea et al. (1982) para uma tubulação vertical ascendente, com massa específica do líquido e do gás de 997 kg/m³ e 1,185 kg/m³, respectivamente.

As velocidades aparentes de líquido e de gás foram selecionadas considerando um dos casos mais crítico para um escoamento padrão golfadas do modelo desenvolvido por Barnea et al. (1982), sendo os números adimensionais Reynolds e Froude, para as condições operacionais do estudo, 17.000 e 84, respectivamente.

A Figura 3 representa esquematicamente um escoamento em golfadas e o como este está sendo tratado no referente estudo. O tempo de pulsação referente a cada fase foi determinada a partir de uma célula unitária composta por pistão de líquido e bolha alongada. O tempo de entrada de gás é a razão entre o comprimento da bolha alongada pela velocidade relativa do gás. Para o tempo de entrada do líquido é a divisão do comprimento do pistão pela velocidade relativa do líquido.

Com isso, o presente trabalho realizou uma análise numérica da influência do comprimento da câmara ciclônica na espessura do filme de líquido ao longo da sua extensão. Os seguintes valores foram adotados para a altura “H” da Figura 1: 100 mm, 200 mm, 300 mm, 400 mm, 500 mm e 1.000 mm. O tempo real simulado para todas as geometrias foi de dois segundos e os resultados foram salvos a cada 0,04 segundos.

O comportamento da espessura média na saída de cada câmara ciclônica em função do tempo é apresentado na Figura 4 separadamente, pretendendo-se analisar a estabilidade do filme de líquido na saída. É representada a espessura média pela linha tracejada e as oscilações pela linha contínua. Nota-se que a amplitude das oscilações da espessura aumenta na medida em que o comprimento da geometria também aumenta e, para alturas superiores a 300 mm ocorre um aumento significativo no valor das amplitudes que se aproximam de 13 mm, ou seja, mesma grandeza do raio da câmara ciclônica. Pode observar também, que as oscilações da espessura se tornam, aproximadamente, periódicas ao decorrer do tempo, facilitando uma previsão do comportamento da espessura do filme de líquido em casos com mais de dois segundos simulados.

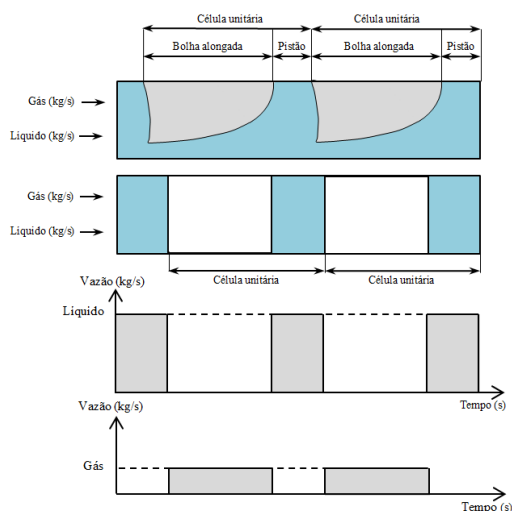


Figura 3. Esquema representativo da pulsação entre as vazões de líquido e de gás.

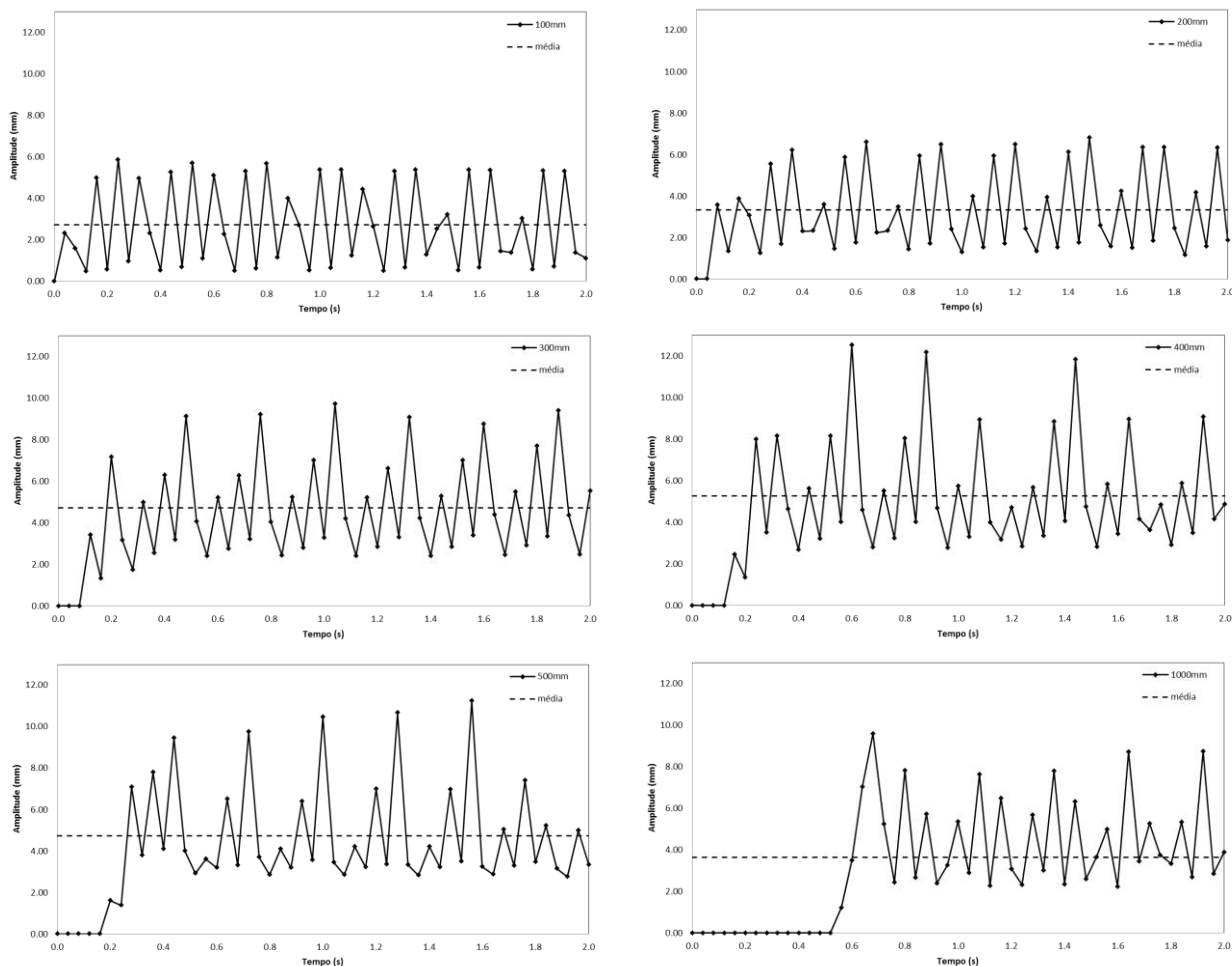


Figura 4. Variação da espessura na saída de cada geometria em função do tempo.

Na Figura 5 mostra-se a comparação entre os valores da espessura média em cada altura relativa das dimensões propostas. Para calcular a espessura média, foi determinado o valor da área transversal do tubo ocupada pelo filme de líquido em diversos planos ao longo da câmara ciclônica (os planos foram distribuídos na direção Z a cada 25 mm) e então calculado o valor médio da espessura. Vale ressaltar que, para a mesma altura, todas as geometrias possuem comportamento semelhante, exceto na saída. Neste caso, a espessura média na saída passa a ser menor que as espessuras médias das outras geometrias, pois nelas o filme de líquido ainda continua escoando. Acredita-se que isto

acontece pelo fato de que como o líquido sai da câmara, deixa de exercer a força peso no restante do líquido que ainda se encontra no interior da câmara ciclônica.

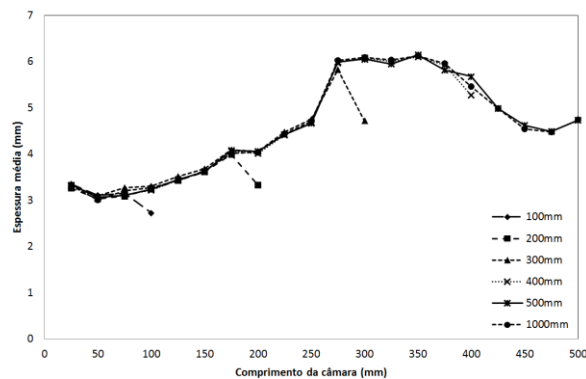


Figura 5. Comportamento da espessura média relativa a cada dimensão ao longo da câmara ciclônica.

Agora, comparando o perfil médio temporal da espessura, como pode ser visto na Figura 6, pode-se reparar que as espessuras se comportam igualmente em suas respectivas alturas, mesmo que tenham grandes diferenças nas amplitudes ao longo do tempo como visualizado Figura 4.

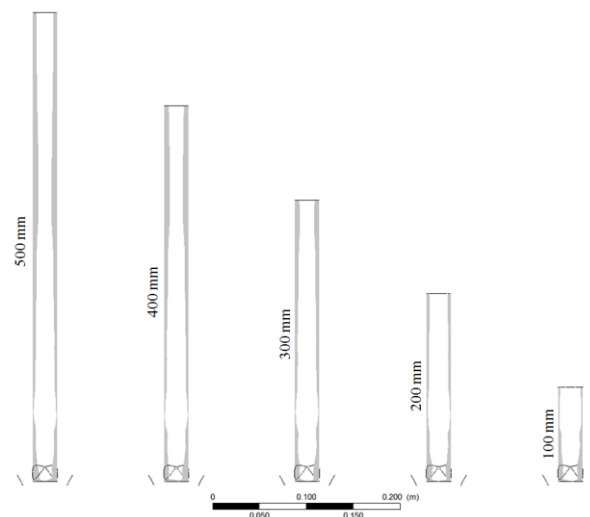


Figura 6. Perfil da média no tempo da espessura nas geometrias.

A Figura 7 apresenta o desvio padrão relacionado à espessura média. Foi calculado o desvio padrão médio na saída por todo o tempo simulado e então se determinou a média desses desvios padrões, para que pudesse observar qual geometria possui menor variação percentual foi relacionado à espessura média do filme de líquido. Notou-se que o desvio médio diminuiu de acordo com o aumento da tubulação até chegar à geometria de 500 mm e depois aumentou para a geometria de 1.000mm. Embora as geometrias 400 mm e 500 mm, como mostrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, tenham maiores amplitudes que as demais, elas possuem maiores quantidades de pontos próximos à média, fazendo com que o desvio padrão médio seja menor que as outras geometrias.

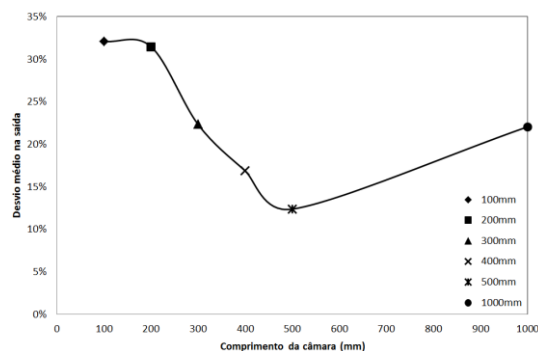


Figura 7. Comparação do ângulo médio das linhas de correntes na saída da câmara ciclônica.

A Figura 8 mostra a comparação do ângulo médio das linhas de correntes na saída de cada geometria. O cálculo do ângulo foi realizado aplicando o arco seno na divisão da média da velocidade axial pela média do módulo do vetor velocidade. Assim, como no escoamento de filme de líquido descendente, quanto mais longa for a tubulação mais o vetor velocidade se aproxima do ângulo de 90 graus com a horizontal. Isto acontece pelo fato de que a ação do campo centrífugo começa a exercer menor influência do que o campo gravitacional no escoamento à medida que o comprimento aumenta. A geometria de 400 mm teve um desvio no comportamento em relação às demais geometrias, isso se deu ao fato de ela possuir um desempenho não periódico como mostrado na Figura 4, não se sabe ao certo o motivo, mas acredita-se que seja ao fato do escoamento, nesta altura, estar em algum regime de transição.

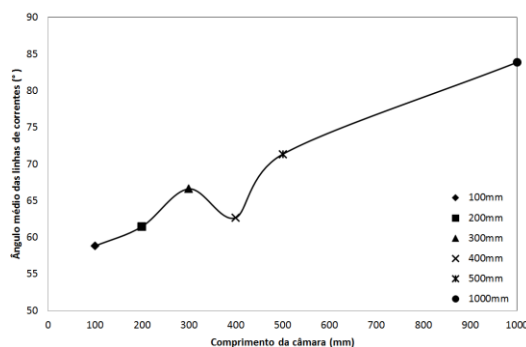


Figura 8. Comparação do ângulo médio das linhas de correntes na saída de cada geometria.

Com a diminuição da velocidade axial ao longo do comprimento da câmara ciclônica, citado a cima, diminui também o módulo do vetor velocidade das linhas de correntes. Com isso, observa-se na Figura 9, que com o aumento do comprimento da geometria, aumenta a influência do campo gravitacional e diminui o módulo do vetor velocidade do escoamento de filme de líquido. Para o cálculo da velocidade média, aproveitando os mesmos planos utilizados no cálculo da espessura média, realizou uma integral de área para o módulo da velocidade e dividiu pela área do filme de líquido na seção transversal. Nota-se que o comportamento da velocidade média no comprimento se assemelha a Figura 5, em que os valores se diferenciam apenas nas saídas das geometrias.

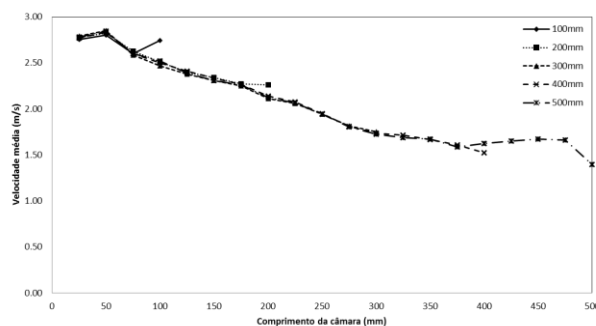


Figura 9. Comparação da velocidade média na saída de cada geometria.

4. CONCLUSÕES

Esse trabalho apresenta o estudo numérico de um escoamento de filme de líquido ascendente sob a ação dos campos centrífugo e gravitacional. O comportamento do filme de líquido, a espessura, o ângulo de inclinação das linhas de correntes e a velocidade no interior da câmara ciclônica é a finalidade do presente trabalho, em todos os casos, foi analisada a influência do comprimento da câmara no desenvolvimento do filme de líquido.

A análise da variação da amplitude da espessura em função do tempo mostrou que para os comprimentos da geometria de 400 mm e 500 mm possui amplitudes que se aproximam do centro da tubulação. Entretanto, para essa mesma faixa de altura da câmara, foi obtido o menor desvio padrão percentual médio, devido à alta quantidade de pontos presentes próximos a espessura média. Pode-se concluir também que, à medida que alonga a tubulação, maior se torna a espessura média do filme de líquido.

Com o estudo das linhas de correntes e da velocidade do escoamento, conclui-se que quanto maior o tempo que o filme de líquido escoar no interior da câmara ciclônica, maior é a influência do campo gravitacional e da força de atrito no escoamento, tornando a velocidade axial menor e, conseqüentemente, menor a velocidade do líquido. Assim, o ângulo das linhas de correntes do escoamento tende assintoticamente para 90° com a horizontal.

O estudo do escoamento de filme de líquido transiente revelou que na média temporal o perfil da espessura do filme de líquido é semelhante para quaisquer alturas das geometrias estudadas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a realização do presente trabalho a UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná), ao NUEM (Núcleo de Escoamento Multifásico) e a PETROBRAS pela infraestrutura, suporte e auxílio para o desenvolvimento do estudo numérico do escoamento ascendente de um filme de líquido sob o efeito dos campos centrífugo e gravitacional.

6. REFERÊNCIAS

- ANSYS, Inc. ANSYS-CFX® – SOLVER THEORY GUIDE, 2015.
- Barnea, D., Shoham, O., Taitel, Y., 1982, “Flow Pattern Transition For Vertical Downward Two Phase Flow”, Chemical Engineering Science, Great Britain.
- Malamatenios, C., Glannakoglou, K.C., Papailiou, K.D., 1994, “A coupled two phase shear layer/liquid film calculation method formulation of the physical problem and solution algorithm”, Int. J. Multiphase Flow. Great Britain, p. 593-612.
- Morandin, M., 1999, “Modelagem De Um Filme Líquido Sob A Ação Combinada Dos Campos Centrífugo E Gravitacional De Forças: Hidrociclone,” Campinas, Brazil.
- Ninahuanca, H. M.; Stel, H., 2013, “Characterization Of The Flow Dynamics In The Expansion Chamber Of A Cyclonic Separator”, 22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013), Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil ().
- Ninahuanca, H. M.; Stel, H.: “Study Of The Nozzle Diameter Influence In The Fluid Dynamics Of A Cylindrical Hydrocyclone Separator”, IV Journeys in Multiphase Flows, Campinas, São Paulo, Brasil (2015).
- Sant’anna, F.: “Simulação Numérica do Escoamento na Câmara de Expansão do Separador Líquido-Gás VASPS,” Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil (2010).
- Wilcox, D. C.: “Turbulence Modeling For CFD”, 2ª Ed. La Canadá, CA, E.U.A.: Editora DCW Industries (1998).
- Yeoh, G. H., Tu, J., “Computational Techniques for Multi-phase Flows”. Elsevier, 2009.

NUMERICAL ANALYSIS OF A VERTICAL ASCENDANT LIQUID FILM UNDER THE ACTION OF CENTRIFUGAL AND GRAVITATIONAL FIELDS

Henrique Krainer Eidt, hkeidt@gmail.com¹
 Carolina Cimarelli Rodrigues, carolcimarelli@gmail.com²
 Paulo Henrique Dias dos Santos, psantos@utfpr.edu.br³
 Rigoberto Eleazar Melgarejo Morales, rmorales@utfpr.edu.br⁴

^{1, 2, 3, 4} Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Avenida Sete de Setembro 3165, Rebouças, CEP: 80230-901, Curitiba, Paraná.

Abstract. Free surface flows are an important class in fluid mechanics. One type of such flow is called as liquid film. In this paper an analysis of the liquid film development is performed in an ascendant flow influenced by the action centrifugal and gravitational fields. This paper investigated the dynamics of a gas-liquid two-phase flow with the aid of three-dimensional numerical simulations and transients. For the numerical simulations is used the finite volume method based on finite element (ANSYS-CFX software 15.0) and the models: two fluids Eulerian-Eulerian inhomogeneous and turbulence SST (Shear Stress Transport). For capturing the liquid-gas interface is used the compressive advection discretization scheme.

Keywords: numerical analysis, ascendant liquid film, centrifugal and gravitational fields.

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.