5 Resultados de Escoamento Ar/Água

Para prever o escoamento bifásico ao longo de tubulações horizontais e levemente inclinadas, selecionou-se o Modelo de Dois Fluidos uni-dimensional, apresentado no Capítulo 3. Como apresentado, esta formulação necessita de um escoamento base de referência. Para prever a transição de escoamento estratificado para escoamento intermitente, utiliza-se escoamento estratificado como configuração base. Já nos casos de velocidades mais altas de gás, quando o padrão de escoamento esperado é anular, a configuração anular é utilizada como a configuração base.

Neste capítulo, diversos escoamentos ar/água são investigados. Esta combinação de fluidos foi selecionada pois a maioria dos resultados experimentais e numéricos disponíveis na literatura empregam esta combinação de fluidos.

Inicialmente são apresentados resultados da previsão do escoamento no padrão de golfadas na presença de transferência de calor. O principal objetivo desta análise consistiu na validação da metodologia implementada no presente trabalho, onde a temperatura é obtida diretamente da equação da energia.

Na etapa seguinte deste capítulo, investiga-se o escoamento no padrão anular. As equações de conservação do modelo de dois fluidos uni-dimensional não são sempre bem postas, i.e., nem sempre é possível prever este tipo de escoamento. Dessa forma, o principal objetivo desta etapa foi verificar a capacidade da previsão acurada do modelo implementado, ao comparar os principais parâmetros deste tipo de escoamento com dados da literatura disponível.

5.1 Escoamento Ar/Água em Golfada com Troca Térmica

O escoamento ar/água com transferência de calor no padrão estratificado e de golfadas foi analisado por Simões (2012) e Nieckele et al. (2014), utilizando a equação de energia baseada na formulação entálpica. Os resultados numéricos obtidos por Simões (2012) para o padrão de golfadas foram comparados com os

dados experimentais de Lima (2009), mostrando bom desempenho da metodologia.

No presente trabalho, optou-se por resolver a equação da energia diretamente em função da temperatura, conforme apresentado no Capítulo 3. Dessa forma, nesta seção, compara-se os resultados obtidos com a presente formulação na previsão do escoamento no padrão intermitente de golfadas com os dados numéricos de Simões (2012) e experimentais de Lima (2009). O padrão de golfadas foi selecionado para a presente verificação, uma vez que o escoamento é mais complexo que o escoamento estratificado, com variações abruptas de fração volumétrica, pressão e velocidades, sendo, portanto, um bom teste para avaliar a robustez da metodologia. A Tabela 5.1 apresenta os casos selecionados nesta etapa de validação, sendo que os fluidos utilizados foram ar/água. As vazões em massa foram impostas na entrada da tubulação, e a pressão foi mantida constante na saída. A temperatura da parede externa variou linearmente do valor da entrada da seção de teste, T_{w,ext,in}, até a saída da seção de teste, T_{w,ext,in}, até a saída da seção de teste, T_{w,ext,out}.

Casos	\dot{m}_L	\dot{m}_G	Psaída	Tentrada	Tw,ext,in	Tw,ext,out
	(kg/s)	(kg/s)	(kPa)	(K)	(K)	(K)
1_int	1,39	0,0012	137.5	316,9	312,1	305,6
2_int	1,47	0,0007	136.4	316,6	312,2	305,6
3_int	2,35	0,0008	157.5	312,4	308,4	304,3
4_int	2,91	0,0012	178.7	307,7	304,9	300,7
5_int	2,65	0,0012	170.4	309,6	306,3	301,8

Tabela 5.1 - Casos do Lima (2009) simulados por Simões (2012).

Para todos os casos simulados, o aparato experimental consistia em um tubo de 23,811m de comprimento e 0,052m de diâmetro. A seção de teste consistia em um trecho isotérmico de 17,74m seguido de uma seção de troca térmica de 6,071m.

A partir de teste de malha realizado para o caso 2_int, Simões (2012) concluiu que uma malha com espaçamento $\Delta x/D = 0,5$ era adequada visto que a solução não dependia mais da densidade da malha. Desta forma, as simulações dos demais casos foram feitas utilizando malha de $\Delta x/D = 0,5$ e número de Courant igual a 0,05 para garantir que, devido a intermitência do escoamento

estudado, os dados característicos do regime de golfadas pudessem ser captados. Os casos de Lima (2009) simulados no presente trabalho seguiram tais recomendações. Foi utilizada condição de temperatura do ambiente externo imposta e, conforme recomendação de Simões (2012), o coeficiente de convecção externo (h_{ext}) foi determinado pela correlação de Gnielinski (1976). Para todos os casos simulados nesta etapa, o ar foi modelado com a equação de gases ideais.

Assim como Simões (2012), foram simulados 500s de escoamento para garantir tempo suficiente para obtenções de médias e foram descartados os 100s primeiros segundos de simulação de modo a garantir que o regime estatisticamente desenvolvido tivesse sido atingido. A Tabela 5.2 apresenta a comparação entre o fluxo de calor médio, coeficiente de transferência de calor médio e variação da pressão média e da temperatura média ao longo da seção de troca térmica do presente modelo com os resultados obtidos numericamente por Simões (2012).

		Present	te		Simões (2012)			
Casos	q"	h_{TP}	ΔΤ	ΔΡ	q"	h_{TP}	ΔΤ	ΔΡ
	(W/m^2)	(kW/mK)	(K)	(kPa)	(W/m^2)	(kW/mK)	(K)	(kPa)
1_int	17.632	2.908	3,8	0,762	18.000	3.200	4,7	0,849
2_int	17.387	2.958	3,1	0,762	18.000	3.250	4,1	0,763
3_int	19.906	4.224	2,2	1,715	20.500	4.220	2,7	1,649
4_int	19.657	5.120	1,9	2,520	19.500	5.360	2,2	2,694
5_int	20.037	4.601	1,9	2,263	20.000	4.850	2,6	2,273

Tabela 5.2 – Comparação entre modelos numéricos de parâmetros térmicos.

A Figura 5.1 ilustra as comparações dos parâmetros térmicos citados na Tabela 5.2 (determinados numericamente) com os dados experimentais de Lima (2009). Para o fluxo de calor e coeficiente de transferência de calor (Figs. 5.1a e 5.1b) os resultados numéricos são bastante similares. Como pode ser observado os presentes resultados numéricos para fluxo de calor (Fig. 5.1a) são mais próximos dos resultados obtidos experimentalmente, com erro inferior a 20%. Nota-se que o aumento da velocidade da fase líquida contribui significativamente para afastar os resultados numéricos dos experimentais. Quando comparados com os resultados experimentais (Lima, 2009), o erro aumenta, porém não ultrapassa 30%. Uma maior discrepância entre os resultados é observada ao compararmos a queda de

temperatura entre o início e fim da seção (Fig. 5.1c) com os dados experimentais, cujo erro pode chegar a aproximadamente 40%. Neste caso, vale a pena ressaltar que existe uma incerteza maior na determinação das medidas experimentais. Finalmente, apresenta-se na Fig. 5.1d uma comparação entre a queda de pressão obtida ao longo da seção de teste, onde pode-se observar ótima concordância entre os resultados numéricos e um desvio inferior a 20% com relação aos dados experimentais.

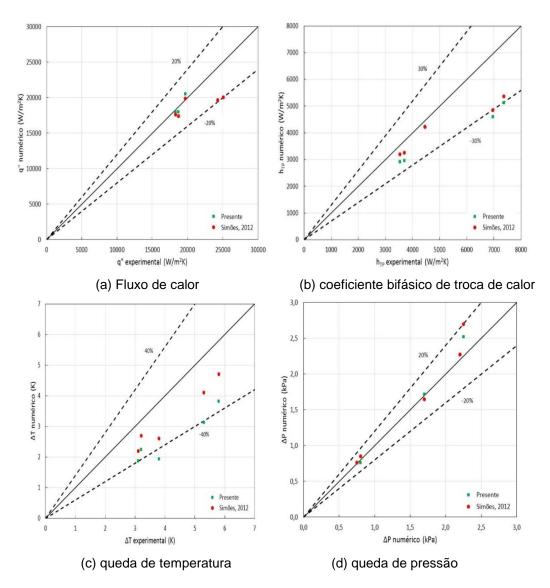


Figura 5.1 – Comparação dos resultados com dados experimentais e numéricos para (a) fluxo de calor (b) coeficiente de transferência de calor (c) queda de temperatura (d) queda de pressão.

A Fig. 5.2 apresenta a variação do *holdup* dos cinco casos avaliados (vide Tabela 5.1) ao longo da tubulação. Comportamento típico de golfada é captado em todos os casos, evidenciando a robustez do modelo e adequação da malha

sugerida por Simões (2012) e utilizada nas simulações.

Uma comparação entre as grandezas estatísticas das golfadas é apresentada na Tabela 5.3, a qual apresenta as velocidades do nariz e cauda das golfadas e fração volumétrica de gás média. Nota-se que os presentes resultados coincidem com os resultados obtidos por Simões (2012). Assim como no trabalho de Simões (2012), foi utilizado como referência de comparação as correlações de Chisholm (Chisholm ,1983) para determinação da fração volumétrica de gás e de Bendiksen (Bendiksen, 1984) para determinação da velocidade da cauda. Diferenças inferiores a 10% são encontradas entre os resultados obtidos e as referências.

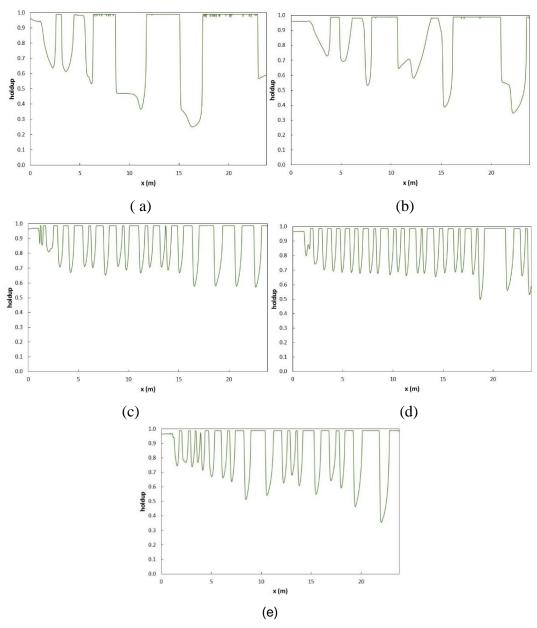


Figura 5.2 – "Holdup" ao longo da tubulação após 500s de escoamento (a) Caso 1_int (b) Caso 2_int (c) Caso 3_int (d) Caso 4_int (e) Caso 5_int.

Os resultados obtidos pelo presente modelo e por Simões (2012) são bastante similares, estando, para todos os parâmetros comparados, com erros semelhantes quando comparados aos resultados experimentais de Lima (2009). Conclui-se que resultados satisfatórios foram obtidos, validando a determinação da temperatura diretamente a partir da equação da energia.

Tabela 5.3 – Comparação entre as grandezas estatística médias das golfadas.

	Presente			Simões (2012)			Ref. U _b	Ref. α _G
Casos	$U_{\rm s}$	U_{b}	O.	U_{s}	U_b	a	U_s	O.
	(m/s)	(m/s)	$lpha_{ m G}$	(m/s)	(m/s)	$lpha_{ m G}$	(m/s)	$lpha_{ m G}$
1_int	1,46	1,32	0,263	1,53	0,72	0,312	1,47	0,282
2_int	1,27	1,14	0,167	1,47	1,19	0,215	1,35	0,175
3_int	1,65	1,35	0,126	1,93	1,93	0,151	1,78	0,125
4_int	2,09	1,76	0,139	2,17	2,14	0,157	2,13	0,145
5_int	2,03	1,72	0,153	2,15	2,09	0,176	2,02	0,153

5.2 Escoamento Ar/Água Anular sem Troca Térmica

Diversos escoamentos de ar/água no padrão anular foram investigados e comparados com dados experimentais disponíveis na literatura de Laurinat (1982), Paras e Karabelas (1991) e Farias (2010). Nos dois primeiros trabalhos, os autores utilizaram tubulações com os mesmos parâmetros geométricos (diâmetro igual a 0,0508 m e comprimento igual a 16 m. Farias (2010) investigou o escoamento no regime anular empregando duas tubulações. Uma delas com diâmetro igual à dos dois primeiros trabalhos, com os quais também comparou suas medidas, porém utilizou uma tubulação mais curta, com 11 m de comprimento. A segunda possuía um diâmetro menor, igual a 0,0158 m e 4 m de comprimento. Todos realizaram as experiências descarregando para a atmosfera e empregaram ar/água. Emamzadeh (2012) analisou numericamente o escoamento no padrão de anular e também comparou os resultados de suas previsões com as medidas de Laurinat (1982) e Paras e Karabelas (1991). Os resultados da presente metodologia também foram comparados com os resultados numéricos de Emamzadeh (2012).

A avaliação de desempenho da metodologia foi subdividida em um estudo associado a perda de carga ao longo do duto para escoamento no padrão anular,

seguida de uma avaliação da espessura do filme. Os casos investigados por Farias (2010) são discutidos na seção final.

Como passo inicial na presente análise, apresenta-se os mapas de padrões correspondentes as tubulações investigadas.

5.2.1 Mapas de Padrões

A Figura 5.3 ilustra o mapa de padrões correspondente a tubulação com 0,0508 m de diâmetro. No mapa também foi introduzida a curva que separa a região onde o modelo é bem/mal posto. A região abaixo da curva do critério de bem/mal posto corresponde a região onde o sistema de equações é bem posto. Os pares de velocidades superficiais testados experimentalmente por todos os autores também foram incluídos na figura. Pode-se observar que todos os casos experimentais encontram-se na região em que o sistema de equações é mal posto. Ainda assim, de acordo com Emamzadeh (2012), foi possível obter solução independente da malha para os casos investigados por Laurinat (1982) e Paras e Karabelas (1991). Emamzadeh (2012) observou não haver mudanças na solução para densidades de malha de $\Delta x/D=0,4$ à 1,6. Com base no estudo numérico de Emamzadeh (2012), selecionou-se no presente trabalho a malha igual a $\Delta x/D=0,6$.

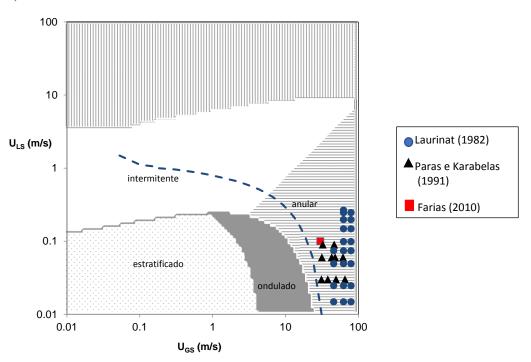


Figura 5.3 – Mapa de padrões, escoamento horizontal de ar/água, *D*=0,0508 m.

A Figura 5.4 ilustra o mapa de padrões correspondente a tubulação de menor diâmetro utilizada por Farias (2010). O par de velocidades superficiais investigado foi igual a U_{sG} = 20 m/s e U_{sL} = 0,14 m/s, e encontra-se indicado na figura. Nota-se que o par de velocidades superficiais testado encontra-se na fronteira da curva que delimita as regiões onde o modelo é bem/mal posto.

Uma vez que este escoamento não foi investigado previamente, realizou-se um teste de malha para definir a resolução adequada a ser empregada no presente trabalho. No teste realizado, foram investigados espaçamentos de $\Delta x/D=0.2$ à 0.6. A Figura 5.5 apresenta o gradiente de pressão entre entrada e saída da tubulação em função do espaçamento de malha. Nota-se que não há variação significativa da solução à medida que a malha é refinada. Portanto, foi decidido utilizar malha de $\Delta x/D=0.3$ para simular o escoamento no duto de diâmetro pequeno.

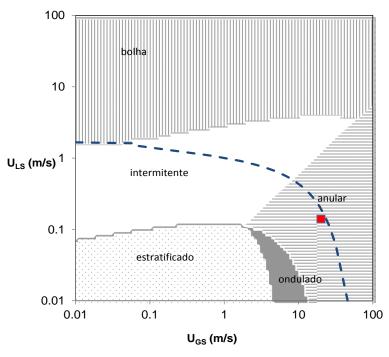


Figura 5.4 – Mapa de padrões, escoamento horizontal de ar/água, *D*=0,0158 m.

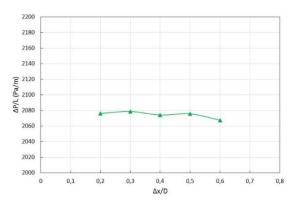


Figura 5.5 – Teste de malha em função de ΔP/L.

5.2.2 Perda de Carga

Para avaliar os parâmetros associados com a perda de carga, selecionou-se o trabalho experimental de Laurinat (1982) e o trabalho numérico de Emamzadeh (2012).

A determinação da queda de pressão depende fortemente das correlações para o fator de atrito. No escoamento anular, como o gás escoa no centro do duto, não tocando as paredes, não há tensão cisalhante do gás na parede. No entanto, o fator de atrito da interface f_i normalmente é calculado baseado em correlações para o gás multiplicadas por um fator de correção.

Inicialmente as simulações para escoamento anular foram realizadas utilizando as correlações para fator de atrito listadas na Tabela 3.1. Tais correlações foram validadas para regime estratificado e intermitente nos trabalhos de Carneiro (2006) e Simões (2009). No entanto, quando aplicadas para regime anular se mostraram inadequadas.

A Figura 5.6 apresenta o gradiente de pressão em função da vazão de líquido para dois pares de vazões em massa de gás. Compara-se o gradiente de pressão previsto pelo presente modelo (sem correção na interface) e as medidas experimentais de Laurinat (1982). Observa-se que os resultados obtidos pelo modelo estão muito abaixo dos resultados obtidos experimentalmente, portanto, pode-se dizer que apesar desta correlação ser de adequada para escoamento intermitente, o modelo com tais correlações não é satisfatório para previsão de escoamento anular.

No escoamento anular o fator de atrito da interface deve ser tratado com particular atenção devido à oscilação do filme de líquido. Logo, uma falha na avalição de f_i pode ser crítica para a avaliação do dp/dx global. Dito isso, apresenta-se na Fig. 5.7, os resultados obtidos no presente trabalho para o fator de atrito na interface com a correlação de Taitel e e Dukler (1976), e compara-se com os dados experimentais de Laurinat (1982). Os resultados são apresentados na Fig. 5.7 em função da vazão de líquido, de forma análoga ao apresentado na Fig. 5.6. Observa-se que os resultados obtidos pelo presente modelo para o atrito interfacial é muito aquém dos resultados experimentais, indicando que este parâmetro pode ser o principal responsável pela falha na determinação do gradiente de pressão.

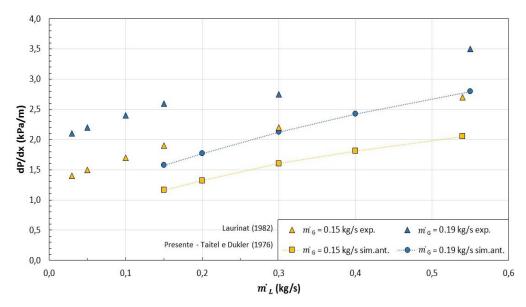


Figura 5.6 – Comparação do gradiente de pressão do presente trabalho com correlação de Taitel e Dukler (1976) para fator de atrito com resultado experimental de Laurinat (1982).

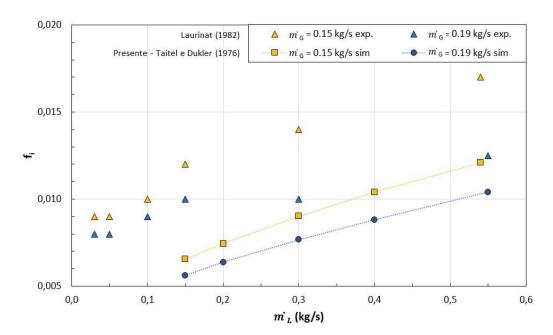


Figura 5.7 – Comparação do fator de atrito da interface do presente trabalho com correlação de Taitel e Dukler (1976) para fator de atrito da interface com resultado experimental de Laurinat (1982)

De acordo com a recomendação de Emamzadeh (2012), visando introduzir o efeito das ondulações na interface do filme de líquido para altas velocidades de gás, empregou-se a correção proposta por Ottens et al. (2001). Manteve-se as mesmas correlações que utilizadas no teste anterior (indicadas na Tabela 3.1), porém introduziu-se a correção de Ottens et al. (2001) na interface. Neste caso,

investigou-se a influência da vazão em massa de líquido no fator de atrito da interface, para três pares de vazões em massa do gás. Os resultados obtidos são comparados com os determinados experimentalmente por Laurinat (1982) na Fig. 5.8, junto com os dados numéricos obtidos por Emamzadeh (2012), que utilizam o conjunto de correlações indicados na Tabela 3.2. Pode-se observar que com a implementação da correção de Ottens et al. (2001) para f_i , obteve-se uma melhora significativa na previsão do fator de atrito com o presente modelo.

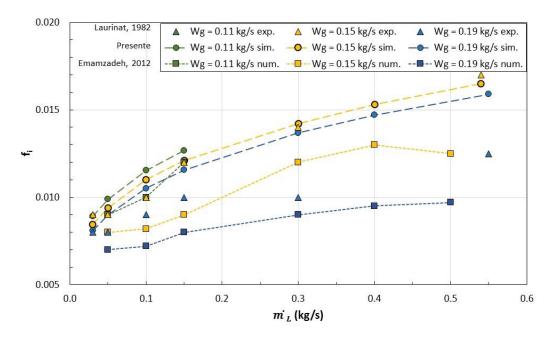


Figura 5.8 – Comparação do fator de atrito da interface do presente trabalho com resultado experimental de Laurinat (1982) e numérico de Emamzadeh (2012).

Estes resultados para o fator de atrito na interface também são apresentados na Fig. 5.9, onde os resultados das simulações com os dois conjuntos de fator de atrito são comparados com os dados experimentais de Laurinat (1982). Pode-se observar claramente a superioridade da previsão do fator de atrito com a presente modelagem em relação aos resultados do modelo de Emamzadeh (2012). A simples correção no fator de atrito na interface resultou em erros inferiores a 10%, enquanto que os resultados de Emamzadeh (2012) encontram-se na faixa de 30% de erro e sempre com valores inferiores aos dados experimentais.

Para verificar o efeito da melhora na previsão do fator de atrito na queda de pressão, apresenta-se na Fig. 5.10, para o mesmo conjunto de vazões, a queda de pressão obtida com as duas modelagens, juntamente com os dados experimentais. Observa-se que quanto maiores as velocidades da fase líquida e da fase gasosa,

maior é o gradiente de pressão devido a maior influência do fator de atrito na interface no escoamento. Os resultados do presente trabalho são muitos bons, especialmente para baixas velocidades da fase gasosa. Para velocidades de gás mais elevadas, o presente modelo prevê gradientes de pressão superiores aos obtidos experimentalmente por Laurinat (1982), enquanto que a modelagem de Emamzadeh (2012) prevê valores inferiores para toda a faixa de vazões investigada. Em comum, nota-se que ambos modelos numéricos apresentam maiores desvios quanto maior for a velocidade do gás.

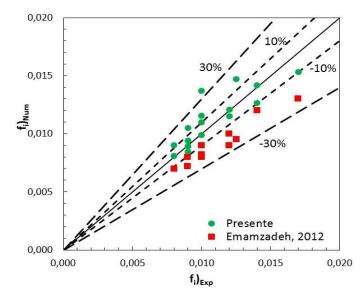


Figura 5.9 – Validação do fator de atrito da interface com dados obtidos numericamente e com dados experimentais.

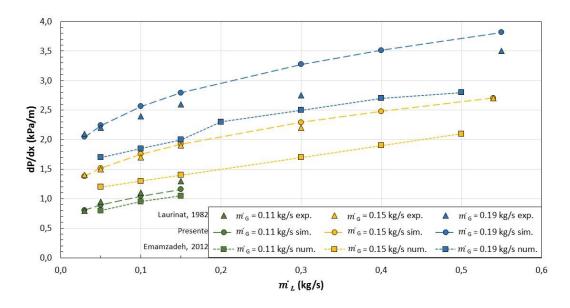


Figura 5.10 – Comparação do gradiente de pressão do presente trabalho com resultado experimental de Laurinat (1982) e numérico de Emamzadeh (2012).

Novamente, apresenta-se uma comparação direta entre os resultados numéricos obtidos com as duas modelagens versus os dados experimentais, na Fig. 5.11. Observa-se que os gradientes de pressão previstos por Emamzadeh (2012) são sempre inferiores aos resultados experimentais, com erros na faixa de 30%. Já os resultados previstos pelo presente trabalho apresentam erro inferiores a 10%.

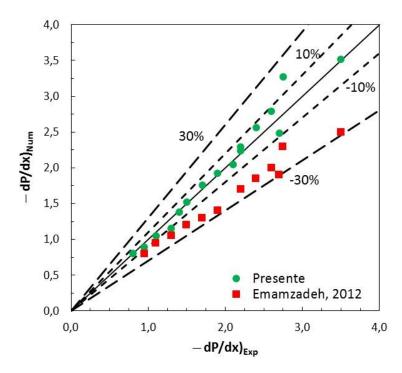


Figura 5.11 – Validação do gradiente de pressão com dados obtidos numericamente e com os dados experimentais.

5.2.3 Altura do Filme de Líquido

A altura do filme de líquido é outro parâmetro caraterístico do escoamento anular. Verificou-se que, assim como para o gradiente de pressão, o fator de atrito da interface também tem grande influência na espessura do filme de líquido. Isto é, avaliou-se a espessura do filme nos testes realizados na seção anterior e observou-se grande variação deste, com a alteração das correlações. Estes resultados não são apresentados, pois não temos dados experimentais de Laurinat (1982) para comparar. Dessa forma, foi selecionado o trabalho experimental de Paras e Karabelas (1991) para validar a previsão da altura do filme de líquido com o modelo proposto nesta dissertação. Emamzadeh (2012) também utilizou os trabalhos experimentais de Paras e Karabelas (1991) para comparar a espessura do

filme de líquido com seu modelo numérico, e seus dados também foram incluídos na presente análise.

O modelo unidimensional proposto capta os valores médios das grandezas e, portanto, prevê filme de líquido de mesma espessura ao longo da circunferência. Experimentalmente sabe-se que a espessura do filme de líquido em escoamento anular horizontal é mais espessa na parte de baixo devido à gravidade. No trabalho de Paras e Karabelas (1991) foi medida, localmente, a espessura do filme de líquido ao longo do tempo em 6 posições entorno da circunferência (θ=0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 315°). A partir destas medidas foi calculado a altura do filme de líquido média ao longo do duto, cujos resultados foram utilizados nas comparações apresentadas na Fig. 5.12.

A Figura 5.12 apresenta a comparação entre a altura do filme de líquido do presente trabalho com dados experimentais de Paras e Karabelas (1991) e Emamzadeh (2012) em função da velocidade superficial de gás, para diferentes velocidades superficiais de líquido. De maneira geral, os resultados apresentaram boa concordância com os dados experimentais. Quanto maior a velocidade da fase gasosa, maior é o desvio da espessura de filme de líquido prevista pelo presente modelo em relação aos resultados experimentais. Para baixas vazões de gás os dados experimentais encontram-se mais próximos dos dados numéricos previstos pelos dois modelos. Com relação a previsão da altura média do filme de líquido, as previsões de Emamzadeh (2012) foram ligeiramente superiores.

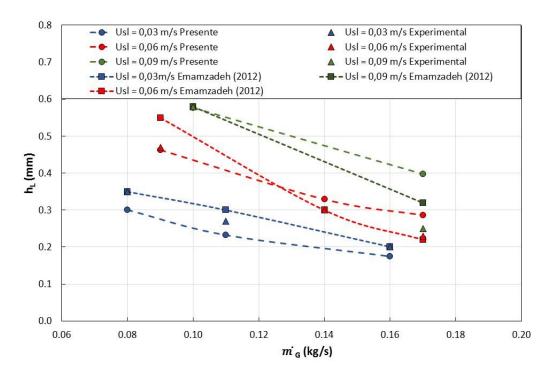


Figura 5.12 – Comparação da altura do filme de líquido do presente trabalho com dados experimentais de Paras e Karabelas (1991) e numéricos de Emamzadeh (2012).

5.2.4 Ondulações na Interface do Filme de Líquido

Farias (2010) realizou um estudo detalhado da estrutura do escoamento anular com visualizações do escoamento na seção transversal. A espessura do filme de líquido é somente medida na parte inferior da tubulação. Como já mencionado, com a presente modelagem, somente valores médios de espessura de filme são obtidos o que inviabilizou uma comparação desta grandeza. Já foi discutida a importância da previsão de ondulações no filme de líquido, as quais podem afetar diretamente a queda de pressão, assim como a espessura do filme. Farias (2010) avaliou experimentalmente as ondas formadas no filme de líquido para um grande conjunto de velocidade de gás e líquido, considerando dois diâmetros (*D*=50,8 mm e *D*=15,8 mm).

No presente trabalho, visando avaliar a capacidade de previsão do presente modelo com relação a captação dessas ondas, foram selecionados dois casos avaliados por Farias (2010) para serem investigados. Os parâmetros geométricos e de escoamento avaliados nesta etapa são apresentados na Tabela 5.4. Na etapa inicial deste capítulo, mostrou-se que o Caso 1_an é mal posto, enquanto que o Caso 2_an encontra-se no limite da região entre bem ou mal posto. Mostrou-se

também que um teste de malha foi realizado para o Caso 2_an e que a malha $\Delta x/D$ =0,3 foi selecionada, para investigar a formação de ondulações na superfície do líquido.

Tabela 5.4 – Parâmetros geométricos e de escoamento do estudo experimental de Farias (2010).

Casos	L (m)	D (m)	U_{sg} (m/s)	U_{sl} (m/s)	P _{saída} (Pa)
1_an	11	0,0508	30	0,10	101325
2_an	4	0,0158	20	0,14	101325

A variação da altura do filme ao longo da tubulação é apresentada nas Figs. 5.13 e 5.14, referentes aos Casos 1_an e 2_an. Em ambos os casos observase uma redução no nível do filme ao longo do duto. Observa-se que pequena ondulação no nível do líquido para o Caso 1_an, porém muito incipiente. Já para o Caso 2_an, observa-se a formação de ondulações no final da tubulação. Os resultados obtidos indicam que o comprimento da tubulação utilizado não permitiu a obtenção de um regime estatisticamente desenvolvimento, o qual permitisse a avaliação das velocidades das ondas formadas no nível do líquido.

Também é importante mencionar, que para malhas mais grosseiras $(\Delta x/D >0,3)$ do que a empregada nos testes apresentados nesta seção, nenhuma ondulação foi captada na interface, indicando que para este tipo de análise também é importante refinar mais a malha.

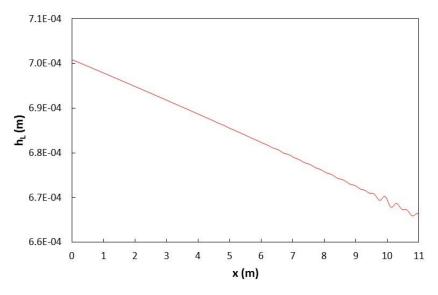


Figura 5.13 – Oscilações ao longo do duto para o Caso 1_an.

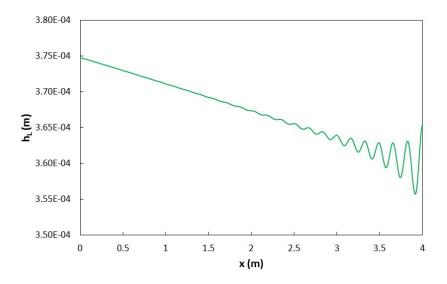


Figura 5.14 – Oscilações ao longo do duto para o Caso 2_an.

5.3 Comentários Finais

A metodologia apresentada no Capítulo 3 foi aplicada na solução de dois padrões de escoamento (golfada e anular) de ar/água, apresentando boa concordância com dados disponíveis na literatura.

A determinação da temperatura diretamente da equação da energia foi obtida com sucesso, com avaliação adequada do fluxo de calor e coeficiente de transferência de calor bifásico.

A proposta de introduzir uma correção para o fator de atrito da interface para escoamento no padrão anular, conforme recomendado por Emamzadeh (2012) mostrou-se eficiente. Melhor previsão para a perda de carga foi obtida com o conjunto de fatores de atrito para fase gasosa e líquida indicados na Tabela 3.1 e para interface indicado na Tabela 3.2. A metodologia foi capaz de prever o padrão anular com boa concordância com dados experimentais para grandezas médias do escoamento com perda de carga e altura do filme, mesmo para pares de velocidade fora da região prevista de modelo bem posto.

Uma importante característica que pode ser obtida a partir das ondulações captadas no nível de líquido é a velocidade da onda. Farias (2010) determinou este parâmetro para o Caso 2_an através da metodologia de correlação cruzada. Infelizmente o presente modelo captou tais oscilações somente no final da tubulação, sendo que claramente as ondas observadas na Fig. 5.13 não atingiram regime de escoamento estaticamente desenvolvido. Portanto, não foi possível

determinar a velocidade de propagação da onda e comparar com o resultado experimental pós-processado de Farias (2010).

No teste de malha realizado para o Caso 2_an, com espaçamentos variando de $\Delta x/D$ =0,2 a 0,6, observou-se que não há diferença significativa na solução do gradiente de pressão ($\Delta P/L$). Entretanto, conforme mencionado anteriormente, para malha $\Delta x/D$ >0,3 não são captadas oscilações na interface. Conclui-se que para capturar com precisão as ondulações do nível de líquido, um teste de malha mais rigoroso deve ser realizado, pois a avaliação de somente uma grandeza média global como $\Delta P/L$ pode não ser suficiente para escolha da malha adequada. Adicionalmente, os resultados indicam ser necessário um comprimento maior de tubulação para que as perturbações geradas na interface cresçam, dando origem ao escoamento estatisticamente permanente com ondulações.