5 Resultados

No presente capítulo diversos casos testes são investigados visando validar a metodologia implementada para prever escoamentos bifásicos utilizando o *Modelo de Deslizamento*.

Casos testes foram selecionados a partir do trabalho de Evje e Fjelde (2003) e visam testar situações extremas, de forma a verificar a habilidade do modelo de reproduzi-las.

Após apresentar os casos de validação, aplica-se a metodologia para prever uma situação de golfada severa. Os resultados são comparados com os dados obtidos por Andrianov et al. (2007) e Masella et al. (1998) para a mesma geometria.

5.1 Validação

Como mencionado no Capítulo 3, a metodologia utilizada no presente trabalho foi baseada no artigo de Evje e Fjelde (2003), sendo as variáveis dependentes grandezas auxiliares w_1 ; w_2 e w_3 . Evje e Fjelde (2003) utilizaram variações do método AUSM (Advection Upstream Splitting Method), empregando um procedimento de solução seqüencial das variáveis primitivas (variáveis físicas), com precisão de segunda ordem no espaço. Com relação a integração no tempo, utilizaram o método de Runge-Kutta de dois passos, também com precisão de segunda ordem. A principal característica do método AUSM consiste em separar o fluxo numa parte convectiva e outra de pressão.

Cinco testes foram realizados, utilizando diferentes condições de contorno, visando gerar situações críticas para serem avaliadas. Os testes foram definidos exatamente como sugerido no trabalho de Evje e Fjelde (2003). Os fluidos utilizados são aproximações de fluidos reais como óleo e ar. As correlações que definem o escorregamento entre as fases são simples e não refletem um determinado padrão de escoamento. O objetivo destes testes é analisar o comportamento do modelo frente a diversas situações consideradas críticas para o escoamento bifásico.

Considerou-se um duto horizontal com as seguintes características:

- Comprimento do duto: L = 1.000,0 m
- Diâmetro interno: D = 0,1 m
- Rugosidade absoluta: $\varepsilon = 1.0 \times 10-5$ m

As seguintes propriedades físicas foram definidas para cada fase:

- Velocidade do som no líquido: $a_l = 1.000,0 \text{ m/s}$
- Velocidade do som no gás: $a_g = 316,0 \text{ m/s}$
- Massa específica do líquido de referência: $\rho_{l,ref} = 1.000,0 \text{ kg/m}^3$
- Massa específica do gás de referência: $\rho_{g,ref} = 1,0 \text{ kg/m}^3$
- Viscosidade do líquido: $\mu_l = 5.0 \times 10^{-2}$ Pas
- Viscosidade do gás: $\mu_g = 5.0 \times 10^{-6}$ Pas
- Pressão de referência: $p_{ref} = 1.0 \times 10^5$ Pa
- Temperatura de referência: $T_{ref} = 293.15 \text{ K}$

Os cinco casos são descritos a seguir:

- Caso 1: Testar a convergência do modelo utilizando uma relação de escorregamento simples;
- Caso 2: Transição de escoamento bifásico para monofásico líquido;
- Caso 3: Transição de escoamento bifásico para monofásico gás;
- Caso 4: Testar a estabilidade e convergência do modelo utilizando uma relação de escorregamento complexa;
- Caso 5: Testar a convergência do modelo utilizando uma relação de escorregamento complexa.

Para todos os casos considerou-se como condição inicial que o duto encontrava-se preenchido com líquido ($\alpha_g = 10^{-5}$), sendo que o escoamento sempre se manteve como laminar. A pressão na saída foi sempre mantida igual a pressão de referência. Para todos os casos especificou-se como condições de contorno a vazão mássica da fase líquida e gasosa na entrada. Diferentes relações para C_o e V_{gj} foram especificadas para cada caso.

Os resultados obtidos foram comparados com os dados disponíveis no trabalho de Evje e Fjelde (2003). Analisou-se as variações ao longo do duto das velocidades de cada fase (u_l , u_g), fração volumétrica de gás (α_g) e pressão (P) para o instante final de simulação.

5.1.1 Caso 1

O objetivo deste teste é verificar se o modelo consegue prever um bolsão de gás se deslocando em um meio líquido. Simples correlações para os parâmetros da escorregamento entre as fases forma utilizadas, i.e., valores constantes iguais a $C_o = 1,2$ e $V_{gj} = 0,5$ m/s. Utilizou-se 200 volumes de controle ao longo da tubulação, igual ao utilizado no trabalho de Evje e Fjelde (2003).

As vazões de líquido e gás crescem de zero à 3,0 kg/s e 0,02 kg/s respectivamente em 10 s e permanecem assim até o final da simulação em 250 s. É esperado que um volume de gás se desloque em direção ao fim do duto. As variações com o tempo das vazões mássicas na entrada da tubulação estão resumidas na Fig. 5.1.



Figura 5.1 – Caso 1: Vazões mássicas na entrada em função do tempo

A Figura 5.2 ilustra o perfil da fração de gás α_g ao longo da tubulação, para o instante de tempo t = 250 s. Como inicialmente a tubulação encontrava-se cheia de líquido, neste instante de tempo, o gás chegou somente até aproximadamente o meio da tubulação, com uma fração de gás em torno de 0,45. Pode-se observar o mesmo comportamento que o previsto por Evje e Fjelde (2003), porém o resultado obtido no presente trabalho apresenta um perfil mais suave da fração de gás, uma vez que as aproximações utilizadas para discretizar as equações de conservação são de primeira ordem, enquanto que Evje e Fjelde (2003) utilizaram discretização de segunda ordem no tempo e no espaço.

A comparação da distribuição de pressão para o mesmo instante de tempo, t = 250 s, pode ser vista na Fig. 5.3. Neste caso, como esperado, observa-se claramente a diferença de inclinação da queda de pressão devido a menor perda de carga de gases. Para esta variável a concordância entre os resultados é excelente.



Figura 5.2 – Caso 1: Perfil de fração de gás ao longo do duto, t = 250 s



Figura 5.3 – Caso 1: Perfil de pressão ao longo do duto, t = 250 s

O perfil da velocidade do gás e do líquido ao longo do duto é apresentado na Fig. 5.4. Observa-se um aumento da velocidade do gás na primeira metade do duto devido à expansão do mesmo resultante da queda da pressão. A velocidade do líquido acompanha o crescimento da velocidade do gás devido à interação entre ambos pela relação de escorregamento. A velocidade do líquido na parte final do duto é praticamente constante ($u_l \approx 1,6$ m/s), devido ao fato da presença de gás ser pequena ($\alpha_g = 10^{-5}$), não influenciando a parte líquida. A velocidade do gás no trecho final pode ser calculada diretamente a partir da correlação de escorregamento, Eq. (3.19), e da Eq. (3.17), a qual para α_g desprezível é $j = \alpha_g u_g + \alpha_l u_l \approx u_l$:

$$u_g = C_o \ j + V_{gj} = C_o \ u_l + V_{gj} \approx 1,2 \times 1,6 + 0,5 \approx 2,42$$
(5.1)

Novamente boa concordância é observada, sendo o desvio maior no caso da velocidade do líquido, devido ao gradiente mais acentuado desta na interface entre a mistura e o líquido.



Figura 5.4 – Caso 1: Perfil de velocidade ao longo do duto, t = 250 s

5.1.2 Caso 2

O objetivo deste teste é verificar se o modelo é capaz de lidar com a transição de escoamento bifásico para monofásico líquido. Novamente valores constantes foram arbitrados para os parâmetros de escorregamento entre as fases: $C_o = 1,2 \text{ e } V_{gj} = 0,5 \text{ m/s}.$

Como no caso anterior, as vazões de líquido e gás crescem de zero à 12,0 kg/s e 0,08 kg/s respectivamente, em 10 s. Porém, após 50 s a vazão mássica de gás decresce até zero em 20 s. A simulação termina com 175 s. A variação das vazões mássicas com o tempo na entrada encontram-se resumidas na Fig. 5.5



Figura 5.5 - Caso 2: Vazões mássicas na entrada em função do tempo

As figuras a seguir apresentam a comparação entre os resultados obtidos por

Evje e Fjelde (2003) e os obtidos pelo modelo deste trabalho ambos para 200 volumes de controle.

A Figura 5.6 apresenta a variação da fração de gás ao longo do duto na instante t = 175 s. Observa-se que o modelo foi capaz de lidar com o retorno ao escoamento solitário da fase líquida após um período de convivência das duas fases. Após cessar o fluxo de gás o mesmo se propaga em direção ao fim do duto sendo aprisionado entre bolsões de líquido.



Figura 5.6 – Caso 2: Perfil de fração de gás ao longo do duto, t = 175 s

Assim como no caso anterior, pode-se notar uma excelente concordância entre os resultados com relação a magnitude e distribuição espacial da fração de gás. Excelente predição da perda de carga ao longo do duto (Fig. 5.7) também foi obtida. Observa-se novamente menor perda de carga na porção de gás e a maior perda de carga da parte líquida nas extremidades, como esperado.



Figura 5.7 – Caso 2: Perfil de pressão ao longo do duto, t = 175 s

A influência da fase gás na velocidade da fase líquida pode ser apreciada na figura referente à velocidade do líquido (Fig. 5.8b). Analisando o perfil da velocidade do gás ao longo do duto na Fig. 5.8a, fica claro que esta velocidade aumenta ao longo do trecho preenchido com gás devido a queda na pressão e expansão do gás na tubulação. A diferença entre a velocidade do líquido na entrada e na saída do duto sugere que entra menos líquido do que sai. Este efeito é conseqüência da expansão do gás no meio do duto que leva a um aumento do volume do mesmo. Como o volume do duto não se altera é necessário que o líquido à jusante do bolsão de gás ofereça seu espaço em forma de um aumento na velocidade. Mais uma vez a concordância obtida entre as soluções pode ser considerada satisfatória.



Figura 5.8 – Caso 2: Perfil de velocidade ao longo do duto, t = 175 s.

5.1.3 Caso 3

O objetivo deste teste é análogo ao teste anterior, porém, neste caso desejase verificar se o modelo é capaz de lidar com a transição de escoamento bifásico para monofásico gás, utilizando uma relação simples para o escorregamento entre as fases. As mesmas correlações para C_o e V_{gj} são utilizadas: $C_o = 1$ e $V_{gj} = 0$ m/s.

As vazões de líquido e gás crescem de zero à 12,0 kg/s e 0,04 kg/s respectivamente, em 10 s. Após 60 s a vazão mássica de líquido decresce até zero em 10 s. No tempo de 200 s a vazão mássica de líquido cresce novamente para 12,0 kg/s em 10 s. A simulação termina após 250 s de simulação. As variações das



vazões mássicas da entrada com o tempo estão resumidas na Fig. 5.9.

Figura 5.9 - Caso 3: Vazões mássicas na entrada em função do tempo

Como nos casos anteriores, especificou-se uma malha com 200 volumes de controle e foram comparados os resultados obtidos com os dados de Evje e Fjelde (2003) para a mesma malha.

Observando a Fig. 5.10, fica claro através do perfil suave da curva obtida neste trabalho, que o modelo implementado teve alguma dificuldade em prever alterações abruptas na vazão da fase líquida, ao contrário do caso anterior, onde a alteração ocorreu na vazão da fase gás. Mesmo assim, o presente modelo foi capaz de lidar com a presença de gás em somente uma parte do escoamento. Como já mencionado, uma possível explicação para a obtenção do perfil mais suave da fração de gás consiste na precisão de primeira ordem das aproximações espaciais e temporais utilizadas no presente trabalho, enquanto que esquemas de segunda ordem no espaço e no tempo foram utilizados por Evje e Fjelde (2003).



Figura 5.10 – Caso 3: Perfil de fração de gás ao longo do duto, t = 250 s

A dificuldade em acompanhar alterações bruscas na vazão mássica da fase líquida comprometeu um pouco a previsão da pressão, ilustrada na Fig. 5.11, ficando mais evidente no trecho inicial do escoamento.

Neste caso, observa-se que apesar das pequenas diferenças percentuais entre as velocidades do gás e do líquido do presente trabalho e os dados de Evje e Fjelde (2003), estas não são desprezíveis, como se pode ver nas Figs. 5.12a e 5.12b.



Figura 5.11 – Caso 3: Perfil de pressão ao longo do duto, t = 250 s

Observa-se também nas Figs. 5.12a e 5.12b que as velocidades do gás e do líquido são idênticas devido ao fato dos valores utilizados para C_o e V_{gj} representarem escoamento homogêneo, onde não existe escorregamento entre as fases. Isto pode ser demonstrado utilizando-se as Eqs. (3.17) e (3.19).

$$u_g = C_0 j + V_{gj} = \alpha_g u_g + \alpha_l u_l \Longrightarrow u_g = \frac{\alpha_l u_l}{1 - \alpha_g} = u_l$$
(5.2)



Figura 5.12 – Caso 3: Perfil de velocidade ao longo do duto, t = 250 s.

5.1.4 Caso 4

O objetivo deste caso é testar se o modelo converge para a solução correta utilizando uma relação mais complexa para o escorregamento entre as fases. Segundo Roe (1981) a relação de escorregamento é similar à utilizada para o padrão de escoamento tipo Golfada (*Slug*). Neste caso, os parâmetros da velocidade de escorregamento são: $C_o = 1$ e $V_{gj} = 0.5 \sqrt{1 - \alpha_g}$ m/s.

As condições transientes simuladas são as mesmas do Caso 1. Desta forma, as vazões de líquido e gás crescem de zero à 3,0 kg/s e 0,02 kg/s respectivamente, em 10 s e permanecem assim até o final da simulação em 250 s, como ilustrado na Fig. 5.13. Assim como o Caso 1, foram utilizados 200 volumes de controle para a determinação do campo de velocidades, pressão e frações volumétricas.



Figura 5.13 - Caso 4: Vazões mássicas na entrada em função do tempo

Analisando a Fig. 5.14, referente ao perfil da fração de gás ao longo do duto, pode-se notar o mesmo comportamento previsto no Caso 1, porém maiores valores de fração de gás podem ser observados na primeira metade do duto. Este resultado ilustra que as novas correlações utilizadas para o parâmetro de distribuição $C_o = 1$ e velocidade de deslizamento $V_{gj} = 0.5 \sqrt{1 - \alpha_g}$ m/s induzem maiores valores de fração volumétrica de gás α_g . Isto pode ser explicado pelo fato de que para a mesma vazão mássica, as correlações utilizadas resultaram em velocidades do gás menores, ou seja, mais gás acumulado na tubulação (> α_g).

Analisando a Fig. 5.15, observa-se excelente concordância entre os dados do presente trabalho e da referência, com relação à distribuição da pressão ao longo do duto. As velocidades das fases são apresentadas na Fig. 5.16, onde nota-se um comportamento similar ao do Caso 1, para as velocidades da fase gasosa e da fase líquida. Comparando estes perfis com os obtidos no Caso 1, Fig. 5.4, observa-se uma maior velocidade de escorregamento, com maior diferença entre as fases.

Nota-se ainda uma alteração no perfil da velocidade do gás próximo à região de entrada. Mais uma vez os dois modelos apresentaram resultados muito próximos.



Figura 5.14 – Caso 4: Perfil de fração de gás ao longo do duto, t = 250 s



Figura 5.15 – Caso 4: Perfil de pressão ao longo do duto, t = 250 s



Figura 5.16 – Caso 4: Perfil de velocidade ao longo do duto, t = 250 s

5.1.5 Caso 5

Visando avaliar a influência dos parâmetros da velocidade de escorregamento na transição do escoamento bifásico para monofásico líquido, o Caso 2 foi repetido com a mesma relação complexa, para o escorregamento entre as fases, utilizada no Caso 4, i.e.. $C_o = 1$ e $V_{gj} = 0.5 \sqrt{1 - \alpha_g}$ m/s.

Como no Caso 2, as vazões de líquido e gás crescem de zero à 12,0 kg/s e 0,08 kg/s, respectivamente, em 10 s, e após 50 s a vazão mássica de gás decresce até zero em 20 s (ver Fig. 5.17). A simulação termina com 175 s.



Figura 5.17 - Caso 5: Vazões mássicas na entrada em função do tempo

Visando analisar a influência do número de volumes de controle na qualidade da solução, este caso foi simulado com três malhas diferentes, com 50, 200 e 1000 volumes de controle. Inicialmente o problema foi simulado com uma malha com 200 volumes de controle, igual a malha utilizada por Evje e Fjelde (2003). Posteriormente, selecionou-se uma malha mais grosseira, com 50 volumes de controle e outra mais fina com 1000 volumes de controle. Este teste serve para investigar a influência da ordem de precisão utilizada na discretização das equações de conservação.

A Figura 5.18, referente ao perfil de fração de gás, mostra que mesmo utilizando uma relação mais complexa para a velocidade de *Deslizamento*, o modelo continua apresentando um ótimo comportamento diante de uma transição para o escoamento de puro líquido a partir de um escoamento misto. É evidente também que o aumento no número de volumes de controle melhora a aproximação entre a solução do presente trabalho e a apresentada pelo artigo de Evje e Fjelde (2003), confirmando o comentário realizado de que os perfis mais suaves obtidos neste trabalho estão associados às aproximações de ordem inferior utilizadas.



Figura 5.18 – Caso 5: Perfil de fração de gás ao longo do duto, t = 175 s

A previsão da distribuição de pressão, ilustrada na Fig. 5.19, é muito boa como em todos os casos anteriores. Nota-se que esta variável não é sensível a malha utilizada, pois mesmo com a malha grosseira de 50 volumes de controle, a concordância entre as soluções é excelente.



Figura 5.19 – Caso 5: Perfil de pressão ao longo do duto, t = 175 s

Apesar da distribuição da pressão ao longo do duto não exigir uma malha refinada, o mesmo não pode ser dito com relação ao perfil das velocidades, as quais são ilustradas nas Figs. 5.20a e 5.20b. No entanto, com o refino da malha as soluções obtidas se aproximam do perfil apresentado na referência.

Comparando as velocidades das fases obtidas neste caso, Fig. 5.20, com as velocidades do Caso 2, Fig. 5.8, obtidas com a correlação simplificada da velocidade de escorregamento, observa-se comportamento semelhante para velocidade do líquido, porém o vale apresentado neste caso é mais acentuado.

Assim como no caso anterior, verifica-se que a velocidade do gás é bem mais sensível a correlação utilizada para a velocidade de escorregamento.



Figura 5.20 – Caso 5: Perfil de velocidade ao longo do duto, t = 250 s

5.1.6 Testes de Malha e Passo de Tempo

O objetivo deste item é entender como o modelo utilizado neste trabalho se comporta com relação a variação dos parâmetros numéricos que afetam a precisão da solução: (i) número de volumes de controle (ii) tamanho do passo de tempo.

Os casos selecionados foram os Casos 1 e 3. Os resultados do teste de malha são apresentados na Fig. 5.21 e do teste de passo de tempo na Fig. 5.22.



Figura 5.21 – Influência na malha no perfil de fração de gás, t = 250 s



Figura 5.22 – Influência do passo de tempo no perfil de fração de gás, t = 250 s. 200 volumes de controle

Testaram-se malhas iguais a 500, 1000, 2000 e 4000 volumes de controle. Como esperado, observa-se que quanto mais refinada a malha mais precisa fica a resposta. Este resultado indica claramente que para melhorar a qualidade da solução, a discretização espacial de primeira ordem obriga a utilização de um alto número de volumes de controle.

Para a alteração do passo de tempo foi utilizada a alteração da constante *CFL* (Courant 1967), de 0,05 a 0,5. Neste caso o número de volumes de controle foi mantido constante e igual a 200. Neste caso, nota-se menor sensibilidade dos resultados ao passo de tempo, indicando que a ordem de discretização temporal utilizada no presente trabalho é satisfatória.

5.1.7 Análise da Ordem da Discretização

Como mostrado nos testes apresentados, observou-se que o modelo implementado neste trabalho apresentou soluções mais suavizadas do que as obtidas por Evje S. e Fjelde (2003). Mostrou-se ainda que as soluções se aproximam com o refino da malha, e que o refino do passo de tempo não alterou de forma significativa os resultados. Mencionou-se ainda que diferença entre as soluções deve estar relacionada com a ordem de precisão na discretização das equações utilizadas com cada método. Visando confirmar esta afirmação, nesta seção apresenta-se uma comparação entre os resultados obtidos neste trabalho com os resultados apresentados por Evje S. e Fjelde (2003) para esquemas de

primeira e segunda ordem. A análise é ilustrada somente para o Caso 1, pois somente para este caso Evje S. e Fjelde (2003) apresentaram uma comparação gráfica entre os métodos AUSM de primeira e segunda ordem. Selecionou-se uma malha com 200 volumes de controle.

Os resultados das comparações para a fração de gás, pressão e velocidades das fases são apresentados nas Figs. 5.23, 5.24 e 5.25, respectivamente. Nestes gráficos também foi acrescentada uma curva denominada de "referência", a qual foi obtida por Evje S. e Fjelde (2003) com uma malha extremamente fina. Analisando as Figs. 5.23, 5.24 e 5.25, pode-se notar que o método utilizado neste trabalho corresponde, como esperado, ao método de primeira ordem apresentado no artigo, confirmando a explicação sobre a diferença entre as soluções.



Figura 5.23 – Caso 1: Influência da ordem do esquema no perfil de fração de gás, t = 250 s. 200 volumes de controle



Figura 5.24 - Caso 1: Influência da ordem do esquema no perfil de pressão,

t = 250 s. 200 volumes de controle



Figura 5.25 – Caso 1: Influência da ordem do esquema no perfil de velocidade ao longo do duto, t = 250 s

Mais um teste é realizado, só que agora, comparou-se a solução obtida no presente trabalho com uma malha de 200 volumes de controle com os dados de modelo AUSM segunda ordem, utilizando uma malha de 50 volumes de controle. Observa-se nas Figs. 5.26 e 5.47 para fração de gás, pressão e velocidades das fases, que para o presente modelo apresentar um desempenho similar ao método de segunda ordem de Evje S. e Fjelde (2003), necessita de uma malha quatro vezes maior.



Figura 5.26 – Caso 1: Influência da ordem do esquema, t = 250 s. Presente: 200 volumes; AUSM II: 50 volumes



Figura 5.27 – Caso 1: Influência da ordem do esquema no perfil de velocidade, t = 250 s. Presente: 200 volumes; AUSM II: 50 volumes

5.2 Golfada Severa

Para avaliar a capacidade da presente metodologia em prever uma *Golfada Severa*, investigou-se o escoamento em uma tubulação em L, tal qual a analisada por Andrianov et al. (2007) e Masella et al. (1998). A Figura 5.28 ilustra a geometria de interesse, a qual consiste de um duto horizontal de 60 m, seguido de um duto vertical de 14 m. Os fluidos de trabalho utilizados nas referências e no presente trabalho foram ar e querosene.

Os dados utilizados para a simulação são os seguintes:

- Comprimento do duto: L = 74 m
- Diâmetro interno: D = 0,05 m
- Velocidade do som no líquido: $a_l = 500,0 \text{ m/s}$
- Velocidade do som no gás: $a_g = 316,0 \text{ m/s}$
- Massa específica do líquido de referência: $\rho_l = 1.000,0 \text{ kg/m}^3$
- Massa específica do gás de referência: $\rho_g = 1,0 \text{ kg/m}^3$
- Pressão de referência: $p_{ref} = 1.0 \times 10^{-5}$ Pa
- Temperatura de referência: $T_{ref} = 293 \ ^{\circ}\text{C}$
- Pressão na saída do duto: $p_{out} = 1.0 \times 10^5$ Pa
- Vazão mássica de ar: $\dot{m}_{g_{in}} = 1,96 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$
- Vazão mássica de querosene: $\dot{m}_{l_{in}} = 7,85 \times 10^{-2} \text{ kg/s}$



Figura 5.28 - Configuração do duto para golfada severa

Visando reproduzir os dados das referências (Andrianov et al., 2007 e Masella et al., 1998), foram utilizados os mesmos parâmetros para determinar as equações de fechamento de velocidade de escorregamento

$$C_o = 1 + 0,2 \alpha_l \operatorname{sen}^2(\theta)$$
(5.3)

$$V_{gj} = 0.35 \alpha_l \sqrt{g D} \operatorname{sen}(\theta) \text{ m/s}$$
(5.4)

O fator de atrito foi considerado constante e igual a f = 0,02, como utilizado nas referências. Logo, a solução independe das viscosidades.

Foi verificada a influência da correlação para determinação do fator de atrito. A correlação de Lockhart e Martinelli (1949) apresentada no Capítulo 2 foi testada, utilizando a viscosidade do líquido igual a $\mu_l = 1,5 \times 10^{-6}$ Pas e a viscosidade do gás igual a $\mu_g = 1,5 \times 10^{-5}$ Pas. A utilização da correlação não influenciou os resultados obtidos no presente teste.

Os parâmetros numéricos como condição CFL e espaçamento de malha também foram definidos de acordo com as referências: CFL = 0,5 e $\Delta x = 1$ m.

O escoamento no regime de golfadas é caracterizado por comportamento cíclico devido o acúmulo de líquido no trecho ascendente seguido da expulsão do mesmo. Desta forma, o regime permanente esperado é na realidade um regime estatisticamente permanente, onde a freqüência e intensidade dos eventos são mais importantes que o momento preciso de início dos mesmos. Dessa forma, o escoamento foi simulado partindo do repouso e foi simulado durante 5.000s, um tempo relativamente grande, de forma a atingir a condição de regime

estatisticamente permanente.

O escoamento é avaliado através da freqüência e intensidade das variações de pressão, vazão mássica e fração de líquido em três pontos de interesse: início (x = 0 m), fim do trecho horizontal (x = 60 m) e saída do duto (x = 74 m).

Para visualizar a formação das golfadas, e determinar se o regime estatisticamente permanente foi obtido, apresenta-se na Fig. 5.29 a variação da pressão na base do trecho vertical (x = 60 m), desde o início da simulação. Pode-se observar claramente que após aproximadamente 2200 s, os ciclos de pressão de repetem, indicando que o regime estatisticamente permanente foi atingido.

Para avaliar o escoamento no regime estatisticamente permanente, selecionou-se um intervalo de 1.000 s entre os tempos 2.200 s e 3.200 s onde foram encontrados os resultados cíclicos mais estáveis.



Figura 5.29 – Variação da pressão com o tempo em x = 60 m

As Figuras 5.30a e 5.30b ilustram a variação da pressão com o tempo após atingir o regime estatisticamente permanente em x = 60 m e compara com os resultados numéricos obtidos por Andrianov et al. (2007) e Masella et al. (1998). Observa-se uma boa semelhança entre os resultados previstos no presente trabalho e ambas as referências. Nota-se que a amplitude das oscilações da pressão são bem semelhantes ao trabalho de Andrianov et al. (2007) e um pouco mais acentuadas que as do trabalho de Masella et al. (1998). Com relação ao período das oscilações da pressão, observa-se uma discrepância um pouco maior, pois o período de golfadas previsto por Andrianov et al. (2007) foi de 260 s, enquanto o previsto pelo presente trabalho é de 185 s.



 (a) Comparação com Andrianov (2006)
 (b) Comparação com Masella (1998)
 Figura 5.30 – Comparação da variação da pressão com o tempo após atingir regime estatisticamente permanente em x = 60m

A Figura 5.31 apresenta a comparação da vazão de líquido, após atingir o regime estatisticamente permanente e os dados de Masella et al. (1998), em x = 60m. Observa-se que qualitativamente a solução obtida pelo presente trabalho concorda com os dados de Masella et al.(1998), sendo que os picos de vazão, assim como a freqüência que os picos ocorrem são bem semelhantes. Observa-se, no entanto, uma instabilidade nos dados do presente trabalho, com muitas oscilações quando a fração de líquido aumenta. A Figura 5.32 apresenta um teste de malha realizado por Andrianov et al, (2007), com relação a variação temporal da vazão de líquido com o tempo em x = 60m. Não foi possível comparar os resultados diretamente, devido à falta de informações no artigo com relação a unidades. No entanto, pode-se observar que o modelo de Andrianov et al. (2007), que utiliza um método de segunda ordem (MUSCL) também apresenta oscilações quando a vazão se aproxima de zero. O problema das oscilações encontrado com o presente modelo precisa ser mais bem avaliado. Uma análise de criteriosa da precisão da discretização utilizada deve ser investigada, pois como ilustrado o esquema de primeira ordem utilizado influencia na qualidade da solução.

Ainda analisando a Fig. 5.31, observam-se valores negativos para a vazão mássica de líquido indicando que o mesmo escoa de volta para o trecho horizontal após a produção da parte vertical do duto. A análise da vazão em massa do líquido, explica porque a *Golfada Severa* pode causar estragos quando não

esperada. Durante a Golfada, a vazão mássica de líquido é de aproximadamente $1 \text{ m}^3/\text{s}$, o que é quase treze vezes maior que na entrada (0,07854 kg/s).



Figura 5.31 – Comparação com Masella (1998) da vazão de líquido com o tempo após atingir regime estatisticamente permanente em x = 60m



Figura 5.32 – Variação da vazão de líquido com o tempo em x = 60m. Teste de malha de Andrianov (2006)

A Figura 5.33 apresenta a variação da fração de líquido com o tempo, no regime estatisticamente permanente, na entrada (x=0), na base do duto vertical (x=60m) e na saída da tubulação (x=74 m). Na entrada a fração de líquido oscila em torno de 0,45; Fig. 5.33a. Pode-se observar a formação das golfadas na base do trecho vertical, Fig. 5.33b, e seu reflexo na saída da tubulação, Fig. 5.33c, com uma freqüência quase igual, porém com valores mais baixos da fração de líquido que varia de 0,4 a 0.9.



Figura 5.33 – Variação da fração de líquido com o tempo após atingir regime estatisticamente permanente em x = 0 m

A variação da pressão com o tempo é ilustrada nas mesmas três coordenadas, na Fig. 5.35. Na saída a pressão é mantida constante. Na entrada e na base do duto vertical a pressão oscila com a mesma freqüência. Observa-se que durante o acúmulo de líquido no trecho vertical, a pressão sobe gradativamente até que seja suficiente para expulsar o líquido em uma golfada.



Figura 5.34 - Variação da pressão com o tempo, x = 0 m, 60 m e 74 m

Vale ressaltar que as aproximações utilizadas neste trabalho para discretizar as equações de conservação são de primeira ordem, enquanto que Evje e Fjelde (2003) utilizaram discretização de segunda ordem no tempo e no espaço. Devido à diferença com relação à precisão da discretização empregada nos dois métodos, foram executados alguns testes de malha e passo de tempo conforme apresentado no Apêndice B.