

## Referências Bibliográficas

AL SAFRAN, E., SARICA, C., ZHANG, H.-Q.; BRILL, J., 2005. Investigation of slug flow characteristics in the valley of a hilly-terrain pipeline. *Int. J. Multiphase Flow* 31, 337–357.

ANDRIANOV N., COQUEL F., POSTEL M., TRAN Q. H., 2006. A relaxation multiresolution scheme for accelerating realistic two-phase flows calculations in pipelines. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 54(2), 207 - 236.

BARNEA, D., 1987. A unified model for predicting flow-pattern Transitions for the whole range of Pipe inclinations. *International Journal of Multiphase Flow* 13(1), 1-12.

BARNEA, D., TAITEL, Y., 1993. A model for slug length distribution in gas-liquid slug flow. *Int. J. Multiphase Flow* 19, 829–838.

BARNEA, D., TAITEL, Y., 1994. Interfacial and structural stability of separated flow. *Int. J. Multiphase Flow* 20, 387–414.

BENDIKSEN, K. H., 1984. An Experimental Investigation of the Motion of long bubbles in inclined pipes. *International Journal of Multiphase Flow* 10(4), 467-83.

BENDIKSEN, K.H., MALNES, D., MOE, R., NULAND, S., 1991. The dynamic two-fluid model OLGA: theory and application. *SPE Prod. Eng.* 6, 171–180.

BERNICOT, M.F., DROUFFE, J.M., 1989. Slug length distribution in diphasic transportation systems. In: Fairhurst. 4th International Conference on Multiphase Flow. Chapter 28, 485–493.

BERNICOT, M.F., DROUFFE, J.M., 1991. A slug length distribution law for multiphase transportation systems. *SPE Production Eng.* 6, 166–170.

BLACK, P. S., DANIELS, L. C., HOYLE, N. C., JEPSON, W. P., 1990. Studying Transient Multi-Phase Flow Using the Pipeline Analysis Code (PLAC). *J. Energy Resour. Technol* 112(1), 25

BRILL, J.P., SCHMIDT, Z., COBERLY, W.A., HERNING, J.D., MOORE, D.W., 1981. Analysis of two-phase tests in large diameter flow lines. Prudhoe Bay Field. *SPE J.* 8305, 363–377.

BONIZZI, M., 2003. Transient one-dimensional modelling of multi-phase slug flows. Ph.D. Thesis, Imperial College, University of London.

CARNEIRO, J. N. E., 2006. Simulação Numérica de Escoamentos Bifásicos no Regime de Golfadas em Tubulações Horizontais e Levemente Inclinadas.

Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica – Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro.

CARPINTERO-ROGERO, E., KROSS, B., SATTELMAYER, T., 2006. Simultaneous HS-PIV and shadowgraph measurements of gas-liquid flows in a horizontal pipe. 13th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics Lisbon, Portugal.

CAZAREZ-CANDIA, O., MENDOZA-MAYA, P., 2009. Modeling of Two-Phase Flow in Oil Wells Using a Simplified Two-Fluid Model. *Petroleum science and technology* 27 (17), 1959–1971.

CHUN, M. H. & SUNG, C. K., 1996. Onset of slugging criterion based on characteristics and stability analyses of transient one-dimensional two-phase flow equations of the two fluid model. *Int. Comm. Heat Mass Transfer* 23, 473–484.

De LEEBEECK, A., NYDAL, O.J., 2009. Simulation of large amplitude waves in a slug tracking scheme compared to roll wave experiments at high pressure. *International Journal of Multiphase Flow* 36, 40–50.

DHULESIA, H., BERNICOT, M., DEHEUVELS, P., 1991. Statistical analysis and modelling of slug lengths. 5th International Conference on Multiphase Production, Cannes, BHRA, Cranfield, Beds, 80–112.

DHULESIA, H., HUSTVEDT, E., TOTAL, O., 1993. Measurement and analysis of slug characteristics in multiphase pipelines. 6th International Conference on Multiphase Production, Cannes.

DUKLER, A. E., HUBBARD, M.G., 1975. A model for gas-liquid slug flow in horizontal and near horizontal tubes. *Ind. Eng. Chem. Fund.* 14, 337–345.

EVJE, S., FJELDE K. K., 2003. On a rough AUSM scheme for a one-dimensional two-phase model. *Comput. Fluids* 32, 1497–1530.

FABRE, J.; LINÉ, A., 1992. Modeling of two-phase slug flow. *Ann. Rev. Fluid Mech.* 24, 21–46

FAGUNDES NETTO, J. R., FABRE, J., PÉRESSON, L., 1999a. Shape of long bubbles in horizontal slug flow. *International Journal of Multiphase Flow* 25, 1129-1160.

FEBRES, S. M., 2009. Modelagem tridimensional de golfada unitária em tubulação horizontal com modelo VOF (Volume of Fluid). Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica – Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro

FONSECA JUNIOR, R., 2009. Medição do campo de velocidade e análise estatística das principais variáveis do padrão de escoamento intermitente. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica – Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro

HOLMAS, H., SIRA, T., NORDSVEEN, M., LANTANGEN, H.P., 2008. Analysis of a 1D incompressible two-fluid model including artificial diffusion. *IMA Journal of Applied Mathematics* 73, 651–667.

HOLMAS, H., 2009. Numerical simulation of transient roll-waves in two-phase pipe flow. *Chemical Engineering Science* 65, 1811–1825

ISHII, M., 1975. *Thermo-Fluid Dynamic Theory of Two-Phase Flow*. Eyrolles, Paris.

ISSA, R. I., 2009. Review of applicability of the one-dimensional two-fluid model to the prediction of wave growth and slug evolution in horizontal pipes. 6th International Symposium on Multiphase flow, Heat Mass Transfer and Energy Conversion 1207, 74 – 80.

ISSA, R. I.; KEMPF, M. H. W., 2003. Simulation of slug flow in horizontal and nearly horizontal pipes with the two-fluid model. *Int. J. of Multiphase Flow* 29, 69–95.

KITE, G.W., 1978. *Frequency and risk analyses in hydrology*. Fort Collin:, Water Resources.

MASELLA J. M., TRAN Q. H., D. FERRE, PAUCHON C., 1998. Transient simulation of two-phase Flows in pipes. *International Journal of Multiphase Flow* 24, 739-755.

MANDHANE, J.M., GREGORY, G.A., AZIZ, K., 1974. A Flow Pattern Map for Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes. *Int. J. Multiphase Flow* 1, 537- 53.

NAGHETTINI, M. e De ANDRADE, É. J., 2007. *Hidrologia Estatística*. Serviço Geológico do Brasil – CPRM.

NICKLIN, D. J., WILKES J. O., DAVIDSON J. F., 1962. Two-Phase Flow in Vertical Tubes. *Trans. Inst. Chem. Engrs.* 40. 61-68.

NYDAL, O. J., PINTUS, S., ANDREUSSI, P., 1992. Statistical characterization of slug flow in horizontal pipes. *Int. J. Multiphase Flow* 18, 439–453.

OMGBA-ESSAMA, C., 2004. *Numerical Modelling of Transient Gas-Liquid Flows (Application to Stratified & Slug Flow Regimes)*. PhD Thesis, School of Engineering Applied Mathematics and Computing Group, Cranfield University.

ORTEGA, A. J. M., 2004. *Análise do Padrão Slug em Tubulações Horizontais Utilizando o Modelo de Dois Fluidos*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica – Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro

PATANKAR, 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Corporation.

PRESS, W.H. et al., 1992. *Numerical recipes in Fortran. The art of scientific computing*. Cambridge University Press. Second edition.

PROSPERETTI, A., TRYGGVASON, G., 2007. Computational Methods for Multiphase Flow. Cambridge University Press.

PROVENSANO C. E. C., 2007. Previsão Numérica de Escoamento Bifásico em Tubulações Utilizando o Modelo de Deslizamento. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica – Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro.

SHEMER, L., 2003. Hydrodynamic and statistical parameters of slug flow. *Int. J. Heat and Fluid Flow* 24, 334–344.

TAHA TAHA, Z. F. CUI, 2006. CFD Modelling of slug flow in vertical tubes. *Chemical Engineering Science* 61, 676-687.

TAITEL, Y., 1994. Advances in two-phase flow modeling. *The University of Tulsa Centennial Petroleum Engineering Symposium*. 33-51.

TAITEL, Y., DUKLER, A. E., 1976. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas–liquid flow. *AIChE Journal* 22, 47–55.

UJANG, P.M., LAWRENCE, C.J., HALE, C.P., HEWITT, G.F., 2006. Slug initiation and evolution in two-phase horizontal flow, *International Journal of Multiphase Flow* 32, 527-552.

UJANG, P. M., PAN, L., MANFIELD, P. D., LAWRENCE, C. J. and HEWITT, G. F., 2008. Prediction of the translational velocity of liquid slugs in gas-liquid slug flow using computational fluid dynamics. *Multiphase Science and Technology* 20(1), 25-79.

van HOUT, R., BARNEA, D., SHEMER, L., 2001. Evolution of statistical parameters of gas–liquid slug flow along vertical pipes. *International Journal of Multiphase Flow*. 27, 1579-1602.

WANG, X., GUO, L., ZHANG X., 2006. Development of liquid slug length in gas-liquidslug flow along horizontal pipeline: experiment and simulation. *Chinese J. Chem. Eng.* 14, 626 - 633.

WALLIS, G.B., 1969. *One-dimensional Two-phase Flow* McGraw-Hill, Inc, New York.

WINICKI, D., 2007. Solução das equações do modelo de Dois Fluidos através do método numérico TDMA por blocos. Projeto Final de Graduação. Departamento de Engenharia Mecânica – Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro.

## APÊNDICE A

Diversos são os parâmetros numéricos que influenciam na solução de qualquer método numérico. Para uma solução confiável é preciso garantir que a mesma independa da malha utilizada assim como do passo de tempo. Portanto, neste apêndice inicialmente um teste de malha é apresentado, juntamente com os critérios utilizados para determinação do passo de tempo. A seguir, o desempenho dos dois procedimentos de solução do sistema algébrico apresentados no Capítulo 4 é discutido.

No final deste apêndice ilustra-se a variação temporal de variáveis de interesse do escoamento, para ilustrar o transiente inicial, e a obtenção do regime estatisticamente permanente.

### A.1 Teste de Malha e Passo de Tempo

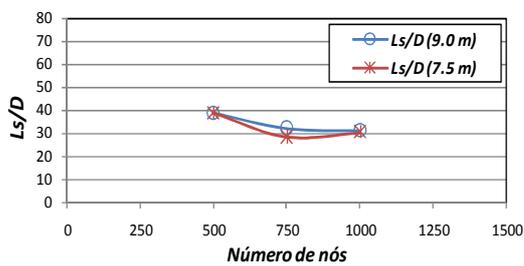
Para garantir independência da solução na malha utilizada, além de confirmar que o sistema de equações do caso selecionado é bem posto, realizou-se um teste de malha.

Os casos selecionados para ser apresentado correspondem à Configuração 2, os quais são do grupo 1 (casos 2 e 3) e do grupo 2 (casos 5 e 6). Foram testados três espaçamentos de malha: 500; 750; 1000. Comparou-se os parâmetros mais importantes que caracterizam o escoamento no regime golfadas como o comprimento da golfada líquida e o comprimento da bolha, para duas posições fixas na tubulação ( $x = 7,5$  m e  $x = 9,0$  m).

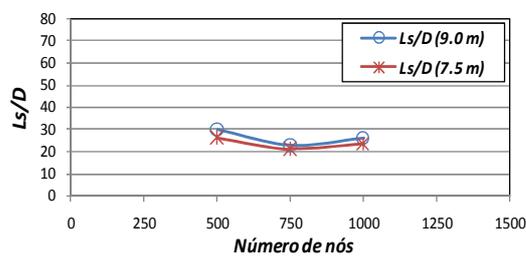
Nas Tabelas A.1 e A.2 apresentam-se os dados obtidos para os quatro casos e os três espaçamentos de malha, e os mesmos dados são apresentados graficamente nas Figs. A1 e A.2, respectivamente. Observa-se que a solução torna-se independente com a malha, confirmando que o sistema é bem posto. Observa-se ainda que as variáveis de uma malha com 750 nós para uma malha de 1000 nós as variações com a malha são pequenas, com o qual pode-se considerar que uma malha de 750 nós pode ser considerada como satisfatória.

Tabela A.1- Teste de Malha, para o Comprimento da Golfada Liquida

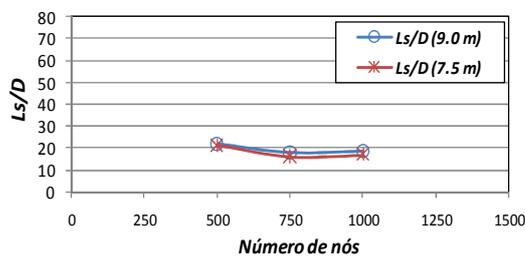
Casos	$x = 7,5 \text{ m}$			$x = 9,0 \text{ m}$		
	Número de nós					
	500	750	1000	500	750	1000
2	38,78	28,45	30,36	38,45	32,17	31,11
3	26,12	21,08	23,14	29,59	22,79	25,79
5	21,10	16,16	17,05	21,99	18,03	18,47
6	11,74	14,73	15,15	12,38	16,59	16,08



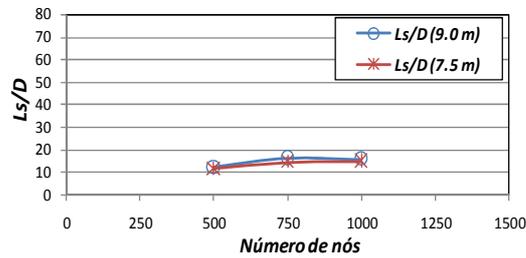
(a) Caso 2



(b) Caso 3



(a) Caso 5



(b) Caso 6

Figura A.1- Influência da malha. Comprimento da Golfada Liquida, configuração 2.

Tabela A.2- Teste de Malha, para o Comprimento da Bolha

Casos	$x = 7,5 \text{ m}$			$x = 9,0 \text{ m}$		
	Número de nós					
	500	750	1000	500	750	1000
2	72,56	57,66	54,95	74,52	57,66	58,84
3	44,94	37,65	38,17	46,75	38,52	38,93
5	70,79	54,03	52,10	71,92	55,71	55,09
6	55,23	41,94	39,61	41,72	43,79	40,77

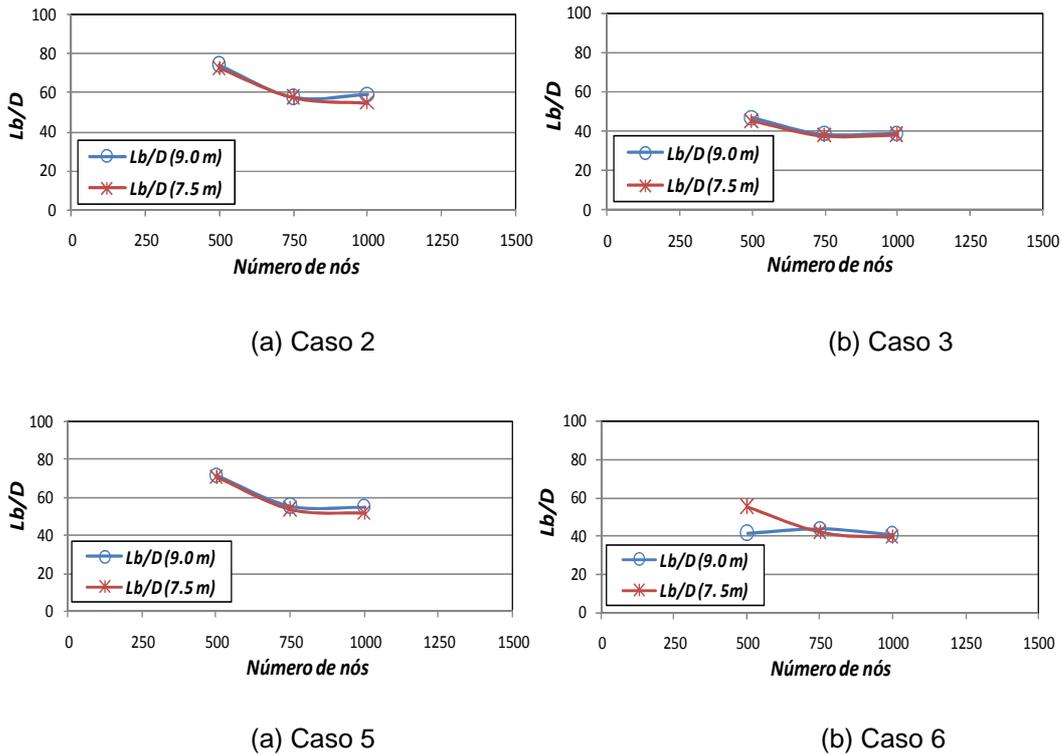


Figura A.2- Influência da malha. Comprimento da Bolha, configuração 2.

O passo de tempo é definido em função do número de Courant. Issa e Kempf (2003) recomendam um número de Courant de 0,5, garantindo que em um passo de tempo uma partícula de fluido teria se deslocado no máximo meio volume de controle. No entanto, verificou-se a necessidade de diminuir o número de Courant de forma a garantir convergência. A Tabela A.3 apresenta se os números de Courant utilizados para cada espaçamento de malha.

Tabela A.3- Teste do Numero de Courant

Numero de Nós	Numero de Courant
500	0,10
750	0,08
1000	0,05
1500	0,05

## A.2 Desempenho dos Procedimentos de Solução

Visando diminuir o tempo de processamento, implementou-se um algoritmo para resolver de forma acoplada as equações de conservação, denominada TDMA por blocos, como mostrado no Capítulo 4.

O Caso 5 da Configuração 2 foi selecionado para ser apresentado. A Tabela A4, ilustra o numero de iterações e tempo de processamento obtido com os dois procedimentos. Pode-se observar, que o número de iterações, assim como o tempo real de processamento foi praticamente o mesmo para os dois casos. A razão em grande parte está associada ao pequeno passo de tempo necessário para garantir convergência do processo. A segunda razão está associada ao fato de que com a metodologia implementada não apresenta um acoplamento total entre velocidade e pressão. A equação para a pressão trata as velocidades de forma explícita, como pode ser observado pelas Eqs. 4.43 e 4.44. Este acoplamento pode ser melhorado se a variável auxiliar definida na Eq. 4.26, e repetida aqui, por tratada de forma implícita.

$$\hat{U}_{K,w} = \frac{a_{ww_{k,i}} U_{K,ww_i} + a_{e_{k,i}} U_{K,e_i} + b_i^K + (1-\gamma) (a_{w_{k,i}} / \gamma) U_{K,w_i}^*}{a_{w_{k,i}} / \gamma} \quad (A1.1)$$

Tabela A.4- Tempo de Processamento. Caso 5 da Configuração 2

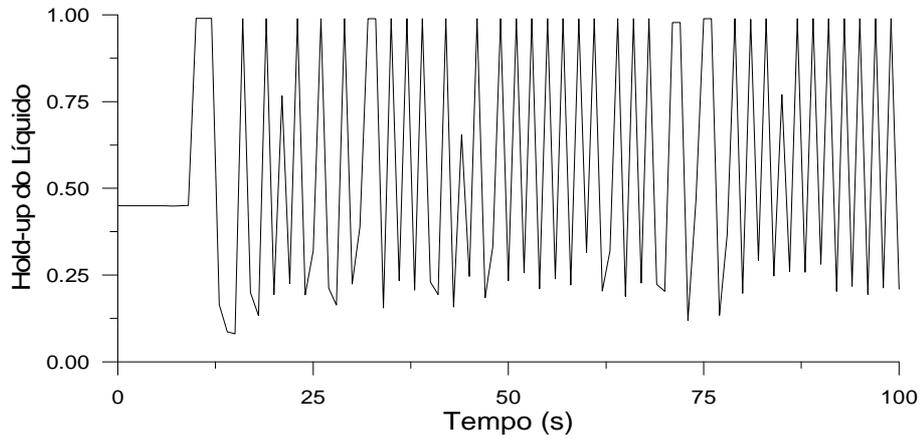
Procedimento	Número de Iterações	Tempo de Processamento
Seqüencial	23623	13,8 s
Blocos	23241	10,3 s

## A.3 Determinação do Regime Estatisticamente Permanente

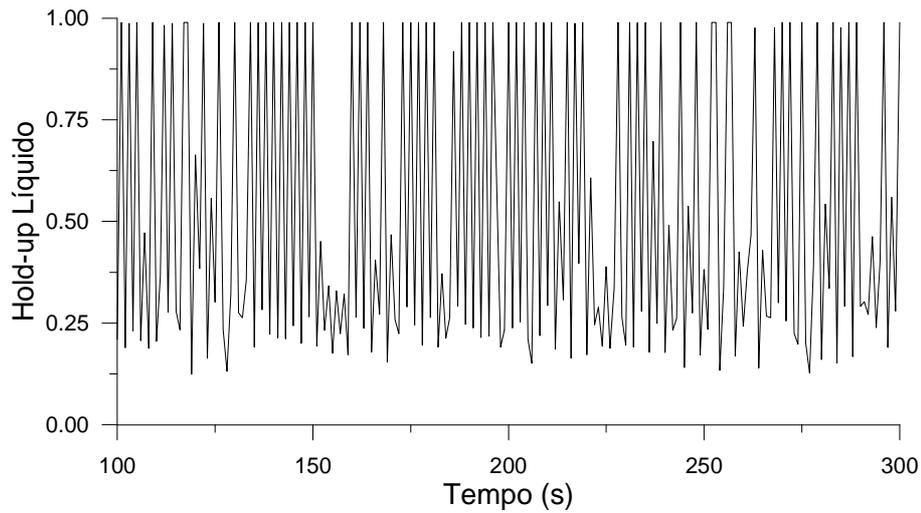
O objetivo desta seção é ilustrar a determinação do instante de tempo a partir do qual as médias temporais podem ser avaliadas. Este tempo deve ser suficientemente longo para que as variáveis flutuem em torno de valores médios, e possa-se afirmar que o regime estatisticamente permanente foi atingido.

Na Figura A.3 apresenta se a evolução do *hold-up* líquido em função do tempo para  $x = 9,0$  m, para o Caso 2 da Configuração 2. Nota-se claramente a

região do transiente inicial (A3a), enquanto que o regime estatisticamente permanente foi claramente obtido para instantes maiores que 100 segundos. Para confirmar que a seleção do instante de tempo para começar a avaliar as médias foi adequada, as médias foram determinadas entre 100 e 200 segundos e a seguir entre 200 e 400 segundos, sendo o resultado obtido igual.



(a) Transiente inicial



(b) Estatisticamente Permanente

Figura A.3- Evolução do *Hold-up* líquido com o Tempo ( $x = 9,0$  m), Caso 2.