

8

Bibliografia

Andreussi, P., Bendiksen, K. H., Nydal, O. J., Void distribution in slug flow, *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 19, pp. 817-828, 1993.

Al-safran, E. M., An experimental and theoretical investigation of slug flow characteristics in the valley of a hilly-terrain pipeline, *Ph.D. Thesis*, University of Tulsa, 2003.

Barbosa Jr., J. R., Aspectos fenomenológicos e modelagem de escoamentos bifásicos líquido-gás, *I Escola brasileira de escoamentos multifásicos*, Cap. 4, São Carlos, 2010.

Barnea, D., Brauner, D., Hold-up of the liquid slug in two-phase intermittent flow, *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 11, pp. 43-49, 1985.

Bendiksen, K. H., An experimental investigation of the motion of long bubbles in inclined pipes, *Int. J. of Multiphase Flow*, vol. 10, pp. 467-483, 1984.

Benjamin, T. B., Gravity currents and related phenomena, *J. Fluid Mech.*, vol. 31, pp. 209-248, 1968.

Bouré, J. A., Delhayé, J. M., General equations and two-phase flow modeling. *In Handbook of Multiphase Systems*, ed. G. Hetsroni, 1982.

Brill, J. P., Schmidt, Z., Coberly, W. A., Herring, J. D., Moore, D. W., Analysis of two-phase tests in large diameter flows lines in Prudhoe Bay Field, *SPE Journal*, 8305, pp. 363-377, 1981.

Carpintero, E. C. R., Experimental Investigation of Developing Plug and Slug Flows, *Ph.D. Thesis*, Technische Universität München, 2009.

Cook, M., Behnia, M., Film profiles behind liquid slugs in gas-liquid pipe flow, *A.I.Ch.E. J.*, vol. 43, pp. 2180-2186, 1997.

Cook, M., Behnia, M., Slug length in near horizontal gas-liquid intermittent flow, *Chemical Engineering Sciences*, vol. 55, pp. 2009-2018, 2000.

Crowe, C. T., Troutt, T. R., Chung, J. N., Numerical models for two-phase turbulent flows, *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 28, pp. 11-43, 1996.

Dukler, A. E., Hubbard, M. G., A model for gas-liquid slug flow in horizontal and near horizontal pipes, *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, vol. 14, pp. 337-347, 1975.

Dumitresco, D., T., Z., "angew" (em russo), *Math. Mech.*, vol. 23, pp. 139, 1943.

Efron, B., Better bootstrap confidence intervals, *Journal of the American Statistical Association*, vol. 82, pp. 171-185, 1987.

Fabre, J., Liné, A., Modeling of two-phase slug flow, *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 24, pp. 21-46, 1992.

Fagundes Netto, J. R., Fabre, J., Peresson, L., Shape of long bubbles in horizontal slug flow, *Int. J. of Multiphase Flow*, vol. 25, pp. 1129-1160, 1999.

Farias, P. S. C. de, Método óptico para caracterização do filme de líquido em escoamento horizontal bifásico anular, *Dissertação de Mestrado*, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), 2010

Fernandes, R. C., Semiat, R., Dukler, A. E. Hydrodynamic model for gas-liquid slug flow in vertical tubes. *AIChE Journal*, vol. 29, pp. 981-989, 1983.

Feynman R, Leighton R, Sands M., The Feynman Lectures on Physics, *Library of Congress Catalog Card No. 63-20717*, 1964.

Fonseca Jr, R. da, Medição do campo instantâneo de velocidade do líquido no escoamento bifásico intermitente em tubos horizontais e inclinados, *Dissertação de Mestrado*, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), 2009.

Fossa, M., Guglielmini, Marchitto, A., Intermittent flow parameters from void fraction analysis, *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 14, pp. 161-168, 2003.

Frechou, D., 1986. Etude de l'écoulement ascendant à trois fluides en conduite verticale. *Thèse Inst. Natl. Polytech.*, Toulouse, 1986.

Ghajar, A. J., Tang, C. C., Advances in void fraction, flow pattern maps and non-boiling heat transfer two-phase flow in pipes with various inclinations, *Advances in Multiphase Flow and Heat Transfer*, vol. 1, pp. 1-52, 2009.

Gregory, G. A., Scott, D.S., Correlation of liquid slug velocity and frequency in horizontal cocurrent gas-liquid slug flow, *AIChE J.*, vol. 15, pp. 833-835, 1969.

Grenier, P., 1997. Evolution des longueurs de bouchons en écoulement intermittent horizontal, *Ph.D. Thesis*, Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT), 1997.

Hewitt, G. F., Flow regimes, *In Handbook of Multiphase Systems*, ed. G. Hetsroni. Washington, DC: Hemisphere, 1982.

Hewitt, G. F., Jayanti, S., Hope, C. B., Structure of thin liquid films in gas-liquid horizontal flow, *Int. J. of Multiphase Flow*, vol. 16, pp. 951-957, 1990.

Hirt, C. W., Nichols B. D., 1981, Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *J. Comput. Phys.*, vol. 39, pp. 201-225, 1981.

Hout, R. van, Barnea, D., Shemer, L., Translational velocities of elongated bubbles in continuous slug flow, *Int. J. of Multiphase Flow*, vol. 28, pp. 1333-1350, 2002.

Hurlburt, E. T., Hanratty, T. J., Prediction of the transition from stratified to slug and plug flow for long pipes, *Int. J. Multiphase flow*, vol. 28, pp. 707-729, 2002.

Ishi, M., Thermo-fluid dynamic theory of two-phase flow, Eyrolles, *Paris (also Scientific and Medical Publication of France, NY)*, 1975.

Kadri, U., Zoetweij, M. L., Muddle, R. F., Oliemans, R. V. A., A growth model for dynamic slugs in gas liquid horizontal pipes, *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 35, pp. 439-449, 2009.

Mandhane, J. M., Gregory, G. A., Aziz, K., A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes, *Int. J. of Multiphase Flow*, vol. 1, pp. 537-553, 1974.

Mattar, L., Gregory, G.A., Air-oil slug flow in an upward-inclines pipe-I: Slug velocity, holdup and pressure gradient, *J. Can. Petr. Tech.*, vol. 13, pp. 69-76, 1974.

Mazza, R. A., Rosa, E. S., Yoshisawa, C. J., Analysis of liquid film models applied to horizontal and near horizontal gas-liquid slug flows, *Chemical Engineering Science*, vol. 65, pp. 3876-3892, 2010.

Moffat, R. J., Contributions to the theory of single-sample uncertainty analysis, *ASME Jornal of Fluids Engineering*, vol. 24, pp. 250-260, 1982.

Montgomery, C. D., Runger, G. C., Applied statistics and probability for engineers, *John Wiley & Sons Inc*, Third edition, 2003.

Nicklin, D. J., Wilkes, J. O., Davidson, J. F., Two phase flow in vertical tubes, *Trans. Inst. Chem. Eng.*, vol. 40, pp. 61-68, 1962.

Nieckele, A. O., Métodos computacionais para escoamento multifásico, *I escola de escoamentos multifásicos*, Cap 6, São Carlos, 2010.

Nogueira, S., Sousa, R. G., Pinto, A.M. F. R., Riethmuller, M. L., Campos, J. B. L. M., Simultaneous PIV and pulsed shadow thecnique in slug flow: a solution for optical problems, *Experiments in Fluids*, vol. 35, pp. 598-609, 2003.

Nydal, O. J., Pintus, S., Andreussi, P., Statistical characterization of slug flow in horizontal pipes , *Int. J. of Multiphase Flow*, vol. 18, pp. 439-452, 1992.

Reinecke, N., Petritsch, G., Boddem, M., Mewes, D., Tomographic imaging of the phase distribution in two-phase slug flow, *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 24, pp. 617-634, 1998.

Ruder, Z., Hanratty, P. J., Hanratty, T. J., Necessary conditions for the existence of stable slugs, *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 15, pp. 209-226, 1989.

Ruder, Z., Hanratty, T.J., A definition of gas liquid plug flow in horizontal pipes, *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 16, pp. 233-242, 1990.

Sanchis, A., Jhonson, G. W., Jensen, A., The formation of hydrodinamic slugs by the interaction of waves in gas-liquid two-phase pipe flow, *Int. J. Multiphase Flow* , vol. 37, pp. 358-368, 2011.

Schubring, D., Behaviour Interrelationships in Annular Flow, *Ph.D. Thesis*, University of Wiscosin, 2010.

Silva, M. O., Caracterização experimental de um escoamento bifásico vertical sujeito aos efeitos de uma expansão abrupta, *Tese de Doutorado*, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2007.

Soria, M. F., Modelagem tridimensional de golfada unitária em tubulação horizontal com modelo VOF (Volume of Fluid), *Dissertação de mestrado*, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), 2009.

Taitel, Y., Barnea, D., Two-Phase Slug Flow, *Advances in Heat Transfer*, vol. 20, pp. 83-132, 1990.

Taitel, Y., Dukler, A.E., A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow, *AIChE Journal*, vol. 22, 1976.

Ujang, P. M., Lawrence, C. J., Hale, C. P., Hewitt, G. F., Slug initiation and evolution in two-phase horizontal flow, *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 32, pp. 527-552, 2006.

Wallis, G. B., One Dimensional Two-phase Flow, *New York: Mc Graw Hill*, 1969.

Wang, X., Guo, L., Zhang, X., An experimental study of the statistical parameters of gas-liquid two-phase slug flow in horizontal pipeline, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, vol. 50, pp. 2439-2443, 2007.

Woods, B. D., Fan, Z., Hanratty, T., Frequency and development of slugs in a horizontal pipe at large liquid flows, *Int. J. of Multiphase Flow*, vol. 32, pp. 902-925, 2006.

Woods, B. D., Hanratty, T., Relation of slug stability to shedding rate, *Int. J. of Multiphase Flow*, vol. 22, pp. 809-828, 1996.

Woods, B.D., Slug formation and frequency of slugging in gas-liquid flows, *Ph.D. Thesis*, University of Illinois, Urbana, 1998.

Zoetewij, M. L., Long liquid slugs in horizontal tubes: development study and characterisation with electrical conductance techniques, *Ph.D. Thesis*, Delft University of Technology Netherlands, 2007.

Zukoski, E. E., 1966. Influence of viscosity, surface tension and inclination angle on motion of long bubbles in closed tubes, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 25, pp. 821-837, 1966.

Apêndice

A Metodologia para a avaliação de incertezas

O presente apêndice destina-se a apresentar uma medida da confiabilidade dos dados experimentais obtidos, usando a metodologia discutida em detalhes por *Moffat (1982)*.

A.1. Avaliação das incertezas nas variáveis medidas pelo sensor

Das discussões apresentadas no Cap. 4 - Procedimento experimental e redução de dados, o sensor apresentava resultados coerentes quando configurado para medir a velocidade da traseira e, por conseguinte, o comprimento do pistão de líquido, o comprimento da bolha alongada e a frequência de passagem de passagem dos pistões. Consequentemente, toda a estimativa de incertezas apresentada neste apêndice é válida para as medidas realizadas com o sensor medindo a velocidade da traseira da bolha.

Se uma variável φ média é função de n medidas médias individuais na forma $\varphi = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n)$ e se a incerteza individual de cada medida δx_i pode ser estimada dentro de um intervalo com 95 % de confiabilidade, a incerteza $\delta\varphi$ de φ , pode ser estimada com o mesmo nível de confiabilidade na forma (*Moffat, 1982*):

$$\delta\varphi = \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial\varphi}{\partial x_i} \delta x_i \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.1})$$

Repetindo aqui a equação para o cálculo da velocidade da traseira u_T (Eq. 4.1), sua incerteza pode ser estimada pela Eq. (A.3):

$$u_T = \frac{\Delta d_{sensor}}{\Delta t_1} \quad (4.1)$$

$$\delta u_T = \left[\left(\frac{1}{\Delta t_1} \delta \Delta d_{sensor} \right)^2 + \left(\frac{d_{sensor}}{\Delta t_1^2} \delta \Delta t_1 \right)^2 \right]^{1/2} \quad (A.3)$$

Estimando as incertezas individuais como $\delta \Delta d_{sensor} = \pm 1 \text{ mm}$ e $\delta \Delta t_1 = \pm 1/20 \text{ MHz}$, a incerteza δu_T pode ser estimada. Em vista a facilitar a clareza nos resultados, essas e outras incertezas são apresentados nas tabelas mostradas mais adiante.

A equação para a frequência f_s e a respectiva equação para estimativa de sua incerteza é dada por:

$$f_s = \frac{1}{\Delta t_3} \quad (4.3)$$

$$\delta f_s = \frac{1}{\Delta t_3^2} \delta \Delta t_3 \quad (A.5)$$

Com a incerteza $\delta \Delta t_3 = \pm 1 \text{ ms}$.

O comprimento do pistão de líquido L_S e sua incerteza δL_S são dados por:

$$L_S = u_T \Delta t_2 \quad (4.2)$$

$$\delta L_S = \left[(\Delta t_2 \delta u_T)^2 + (u_T \delta \Delta t_2)^2 \right]^{1/2} \quad (A.7)$$

Finalmente para o comprimento da bolha L_B , considerando $\delta \Delta t_2 = \delta \Delta t_3 = \pm 1 \text{ ms}$, tem-se:

$$L_B = u_T (\Delta t_3 - \Delta t_2) \quad (4.4)$$

$$\delta L_B = \left\{ \left[(\Delta t_3 - \Delta t_2) \delta u_T \right]^2 + 2(u_T \delta \Delta t_2)^2 \right\}^{1/2} \quad (A.9)$$

A.2.

Tabelas com as estimativas das incertezas das variáveis medidas pelo sensor

Nesta seção, são apresentados os valores médios, os intervalos de confiança para as médias e a estimativa da incerteza experimental associada à medida de cada média. Por fins de clareza, os resultados são condensados numa tabela para cada *sub-matriz* de testes. Por simplificação, é assumido que não haja qualquer incerteza na medida do diâmetro da tubulação.

Sub-matriz # 1										
ponto	j_L (m/s)	j_G (m/s)	u_T (m/s)	u_T I.C. 95 %	$\delta u_T/u_T$ (%)	N	f_s (Hz)	f_s I. C. 95 %	$\delta f_s/f_s$ (%)	N
1	0,2	0,7	1,324	(1,312;1,336)	0,339	369	0,115	(0,112;0,118)	0,010	380
2	0,2	0,9	1,525	(1,514;1,536)	0,336	372	0,132	(0,124;0,140)	0,008	394
3	0,2	1,1	1,801	(1,789;1,813)	0,334	519	0,126	(0,123;0,129)	0,011	531
4	0,2	1,3	2,125	(2,108;2,142)	0,333	372	0,156	(0,152;0,160)	0,014	382
5	0,2	1,5	2,307	(2,288;2,326)	0,332	384	0,143	(0,139;0,147);	0,013	384
6	0,2	1,7	2,387	(2,370;2,404)	0,334	432	0,142	(0,138;0,146)	0,013	438
7	0,2	1,9	2,780	(2,763;2,797)	0,332	381	0,142	(0,138;0,146)	0,014	373
ponto	j_L (m/s)	j_G (m/s)	L_s/D (-)	L_s/D I.C. 95 %	$\delta L_s/L_s$ (%)	N	L_B/D (-)	L_B/D I.C. (95 %)	$\delta L_B/L_B$ (%)	N
1	0,2	0,7	36,061	(34,863;37,259)	0,017	362	-	-	-	-
2	0,2	0,9	38,074	(36,292;39,856)	0,019	348	-	-	-	-
3	0,2	1,1	28,716	(27,893;29,539)	0,018	503	-	-	-	-
4	0,2	1,3	22,845	(21,936;23,759)	0,020	360	-	-	-	-
5	0,2	1,5	24,108	(23,216;25,000)	0,020	368	-	-	-	-
6	0,2	1,7	24,587	(23,760;25,414)	0,020	412	-	-	-	-
7	0,2	1,9	21,237	(20,677;21,797)	0,022	368	-	-	-	-

Tabela A.1. – valores médios, intervalos de confiança para as médias e incertezas relativas para os dados extraídos da sub-matriz 1.

Sub-matriz # 2										
ponto	j_L (m/s)	j_G (m/s)	u_T (m/s)	u_T I.C. 95 %	$\delta u_T/u_T$ (%)	N	f_s (Hz)	f_s I. C. 95 %	$\delta f_s/f_s$ (%)	N
1	0,3	0,7	1,788	(1,758;1,818)	0,318	626	0,201	(0,198;0,203)	0,019	610
2	0,3	0,9	1,859	(1,828;1,890)	0,327	385	0,225	(0,219;0,230)	0,020	380
3	0,3	1,1	2,082	(2,058;2,107)	0,331	391	0,262	(0,253;0,270)	0,022	401
4	0,3	1,3	2,342	(2,316;2,368)	0,329	380	0,263	(0,254;0,271)	0,021	383
5	0,3	1,5	2,534	(2,508;2,559)	0,330	380	0,251	(0,242;0,259)	0,021	375
6	0,3	1,7	2,663	(2,635;2,692)	0,326	421	0,269	(0,259;0,279)	0,020	405
7	0,3	1,9	3,030	(2,996;3,064)	0,326	376	0,289	(0,276;0,301)	0,021	376
ponto	j_L (m/s)	j_G (m/s)	L_s/D (-)	L_s/D I.C. 95 %	$\delta L_s/L_s$ (%)	N	L_B/D (-)	L_B/D I.C. (95 %)	$\delta L_B/L_B$ (%)	N
1	0,3	0,7	32,660	(31,658;33,732)	0,018	602	-	-	-	-
2	0,3	0,9	27,236	(26,071;28,296)	0,019	368	-	-	-	-
3	0,3	1,1	23,931	(22,895;24,930)	0,020	373	-	-	-	-
4	0,3	1,3	23,343	(22,338;24,289)	0,020	364	-	-	-	-
5	0,3	1,5	24,213	(23,317;25,189)	0,021	362	-	-	-	-
6	0,3	1,7	21,855	(21,067;22,642)	0,021	399	-	-	-	-
7	0,3	1,9	22,957	(22,100;23,771)	0,022	356	-	-	-	-

Tabela A.2. – valores médios, intervalos de confiança para as médias e incertezas relativas para os dados extraídos da sub-matriz 2.

Sub-matriz # 3										
ponto	j_L (m/s)	j_G (m/s)	u_T (m/s)	u_T I.C. 95 %	$\delta u_T/u_T$ (%)	N	f_s (Hz)	f_s I. C. 95 %	$\delta f_s/f_s$ (%)	N
1	0,4	0,7	1,658	(1,629;1,686)	0,323	429	0,297	(0,291;0,304)	0,027	410
2	0,4	0,9	1,915	(1,885;1,946)	0,322	433	0,287	(0,281;0,293)	0,026	414
3	0,4	1,1	2,107	(2,082;2,132)	0,327	407	0,329	(0,319;0,339)	0,028	406
4	0,4	1,3	2,349	(2,325;2,373)	0,327	387	0,319	(0,307;0,330)	0,027	393
5	0,4	1,5	2,533	(2,503;2,563)	0,325	398	0,394	(0,381;0,406)	0,032	380
6	0,4	1,7	2,755	(2,722;2,788)	0,324	428	0,411	(0,397;0,425)	0,033	422
7	0,4	1,9	3,183	(3,146;3,219)	0,324	417	0,379	(0,370;0,389)	0,034	414
ponto	j_L (m/s)	j_G (m/s)	L_s/D (-)	L_s/D I.C. 95 %	$\delta L_s/L_s$ (%)	N	L_B/D (-)	L_B/D I.C. (95 %)	$\delta L_B/L_B$ (%)	N
1	0,4	0,7	23,427	(22,547;24,418)	0,019	405	90,834	(87,77;93,90)	0,016	383
2	0,4	0,9	24,615	(23,701;25,546)	0,019	412	112,444	(109,00;115,88)	0,017	390
3	0,4	1,1	22,878	(22,094;23,696)	0,020	388	113,851	(109,70;117,95)	0,018	372
4	0,4	1,3	22,947	(22,129;23,821)	0,020	370	136,562	(131,61;141,51)	0,019	356
5	0,4	1,5	19,367	(18,601;20,075)	0,022	384	118,509	(114,28;122,74)	0,018	363
6	0,4	1,7	19,651	(18,958;20,401)	0,022	410	124,491	(119,97;129,01)	0,019	396
7	0,4	1,9	21,239	(20,482;22,076)	0,023	397	154,472	(149,66;159,28)	0,020	382

Tabela A.3. – valores médios, intervalos de confiança para as médias e incertezas relativas para os dados extraídos da sub-matriz 3.

Sub-matriz # 4										
ponto	j_L (m/s)	j_G (m/s)	u_t (m/s)	u_T I.C. 95 %	$\delta u_T/u_T$ (%)	N	f_s (Hz)	f_s I. C. 95 %	$\delta f_s/f_s$ (%)	N
1	0,5	0,7	1,680	(1,657;1,702)	0,329	381	0,437	(0,428;0,446)	0,039	376
2	0,5	0,9	1,976	(1,955;1,998)	0,329	387	0,462	(0,451;0,472)	0,040	384
3	0,5	1,1	2,162	(2,140;2,184)	0,330	385	0,478	(0,462;0,493)	0,039	380
4	0,5	1,3	2,433	(2,407;2,460)	0,328	383	0,440	(0,425;0,453)	0,036	375
5	0,5	1,5	2,704	(2,673;2,735)	0,328	390	0,402	(0,385;0,417)	0,030	402
6	0,5	1,7	3,097	(3,059;3,136)	0,323	380	0,434	(0,418;0,451)	0,035	388
7	0,5	1,9	3,388	(3,344;3,432)	0,324	417	0,440	(0,424;0,456)	0,035	424
ponto	j_L (m/s)	j_G (m/s)	L_s/D (-)	L_s/D I.C. 95 %	$\delta L_s/L_s$ (%)	N	L_B/D (-)	L_B/D I.C. (95 %)	$\delta L_B/L_B$ (%)	N
1	0,5	0,7	21,083	(20,465;21,772)	0,019	359	57,227	(55,74;58,70)	0,013	338
2	0,5	0,9	19,221	(18,548;20,016)	0,020	368	67,985	(65,97;70,00)	0,015	351
3	0,5	1,1	18,320	(17,675;18,978)	0,021	372	78,272	(75,44;81,11)	0,015	354
4	0,5	1,3	20,866	(20,040;21,683)	0,021	370	98,445	(94,66;102,23)	0,017	347
5	0,5	1,5	23,994	(23,023;25,000)	0,020	380	130,980	(125,18;136,78)	0,019	375
6	0,5	1,7	20,643	(19,794;21,545)	0,023	358	137,605	(131,75;143,46)	0,019	347
7	0,5	1,9	20,661	(19,848;21,451)	0,024	397	151,144	(145,04;157,25)	0,020	384

Tabela A.4. – valores médios, intervalos de confiança para as médias e incertezas relativas para os dados extraídos da sub-matriz 4.

A.3.

Histogramas do comprimento do pistão de líquido, da frequência de passagem dos pistões e do comprimento da bolha alongada

Nesta seção, são apresentados os histogramas obtidos através das medidas do sensor configurado para a medição da velocidade da traseira da bolha alongada.

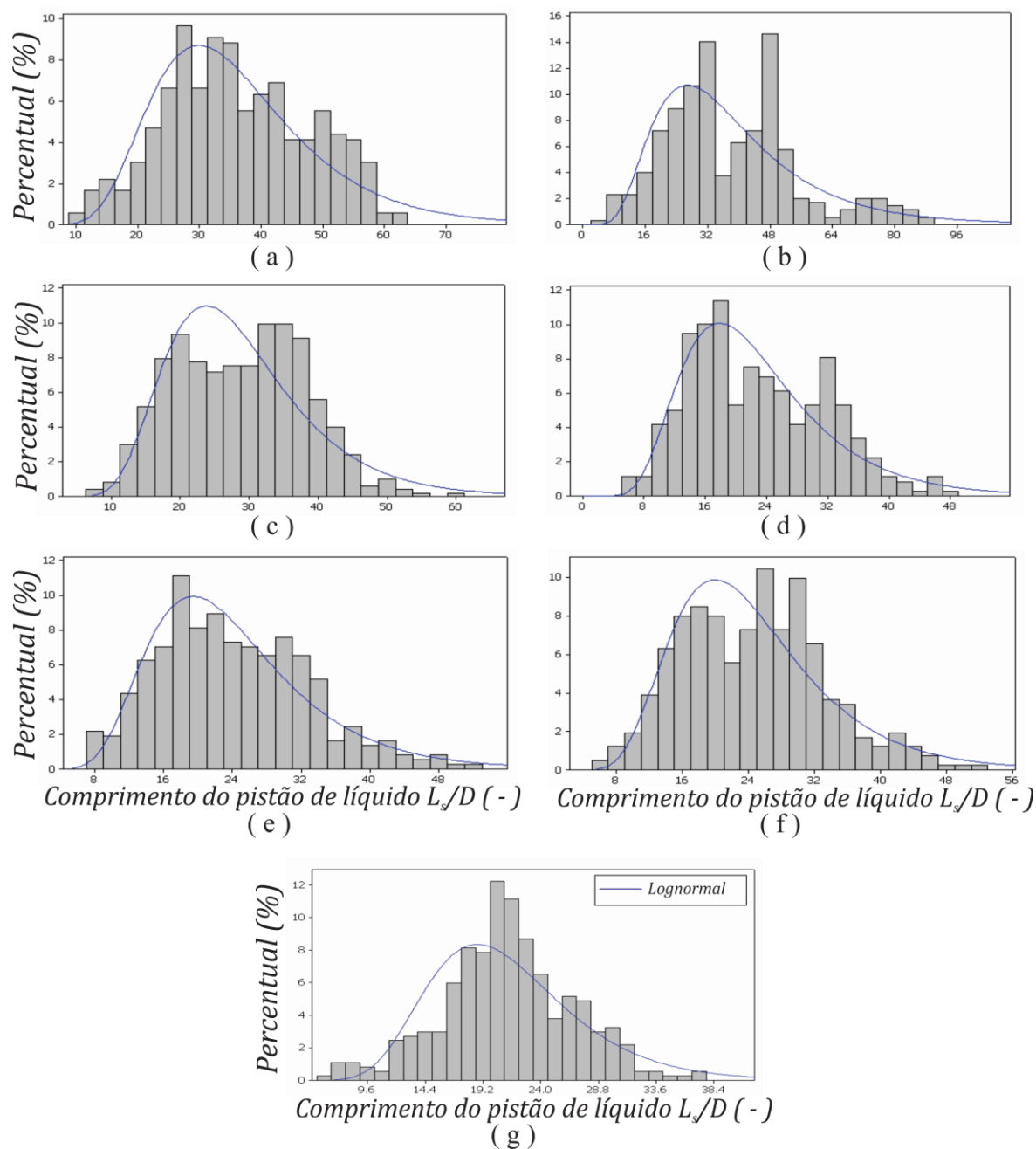


Figura A.1 - Histogramas do comprimento do pistão de líquido para a sub-matriz # 1.

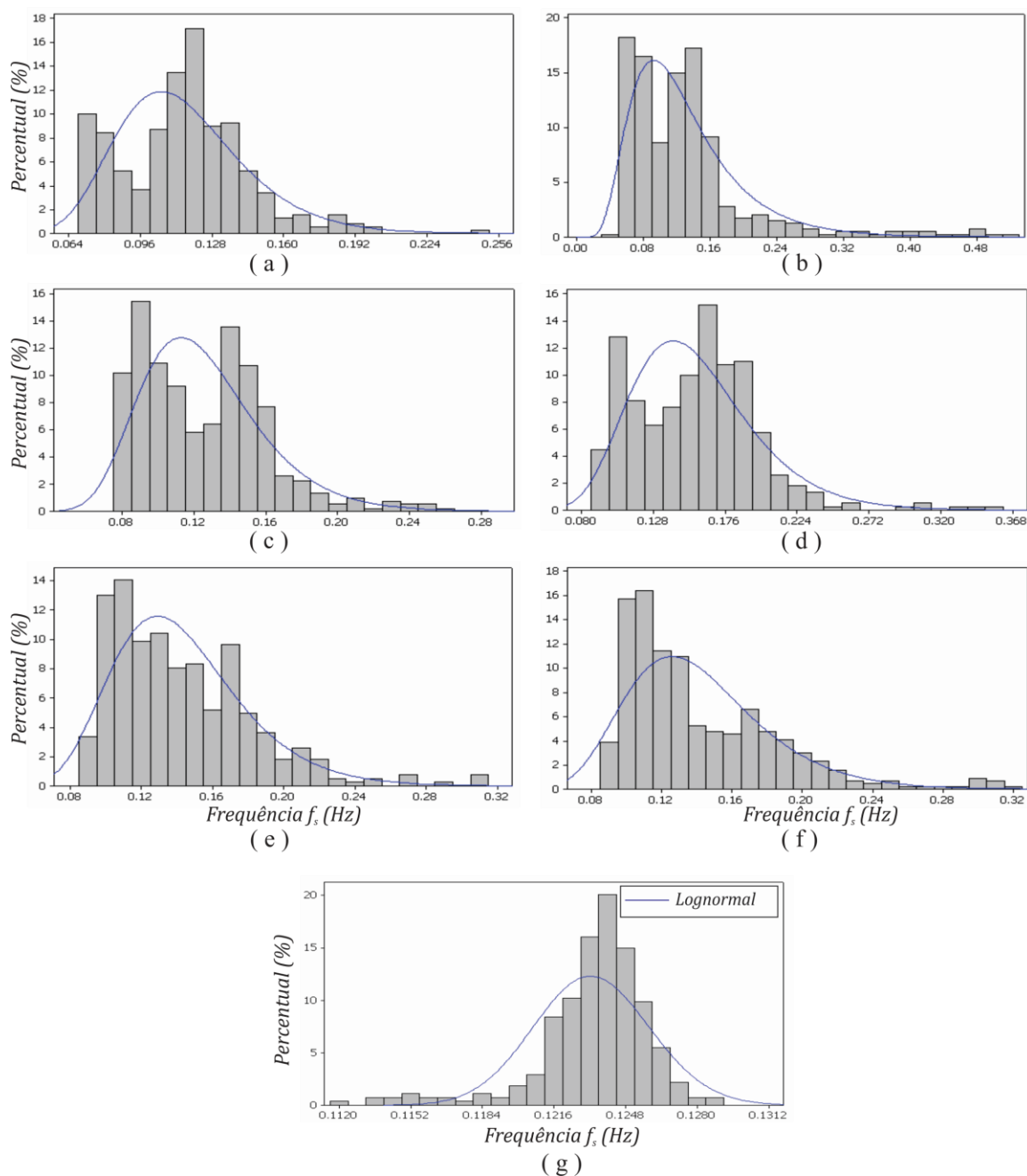


Figura A.2 - Histogramas da frequência de passagem dos pistões de líquido para a sub-matriz # 1.

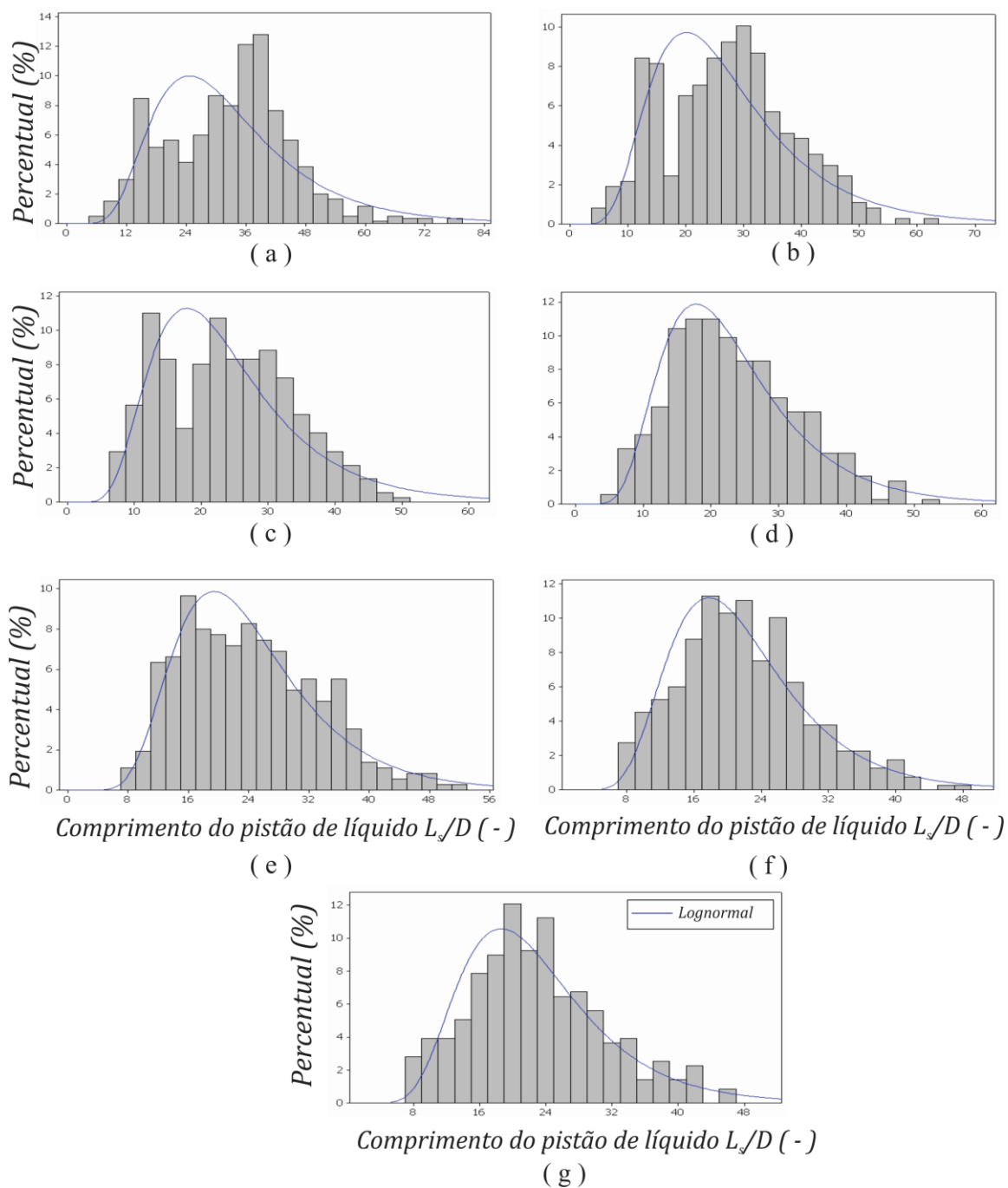


Figura A.3 - Histogramas do comprimento do pistão de líquido para a sub-matriz # 2.

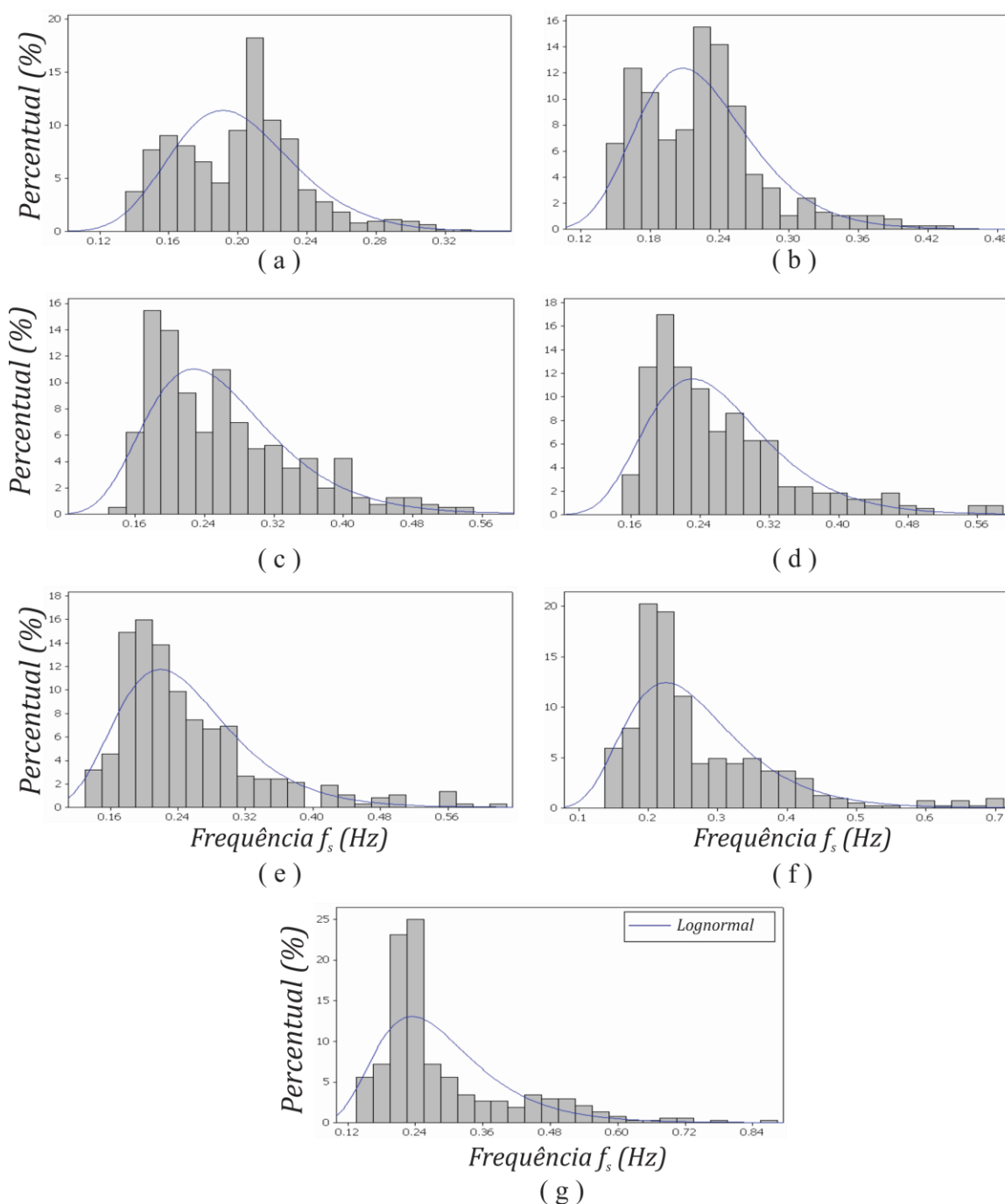


Figura A.4 - Histogramas da frequência de passagem dos pistões de líquido para a sub-matriz # 2.

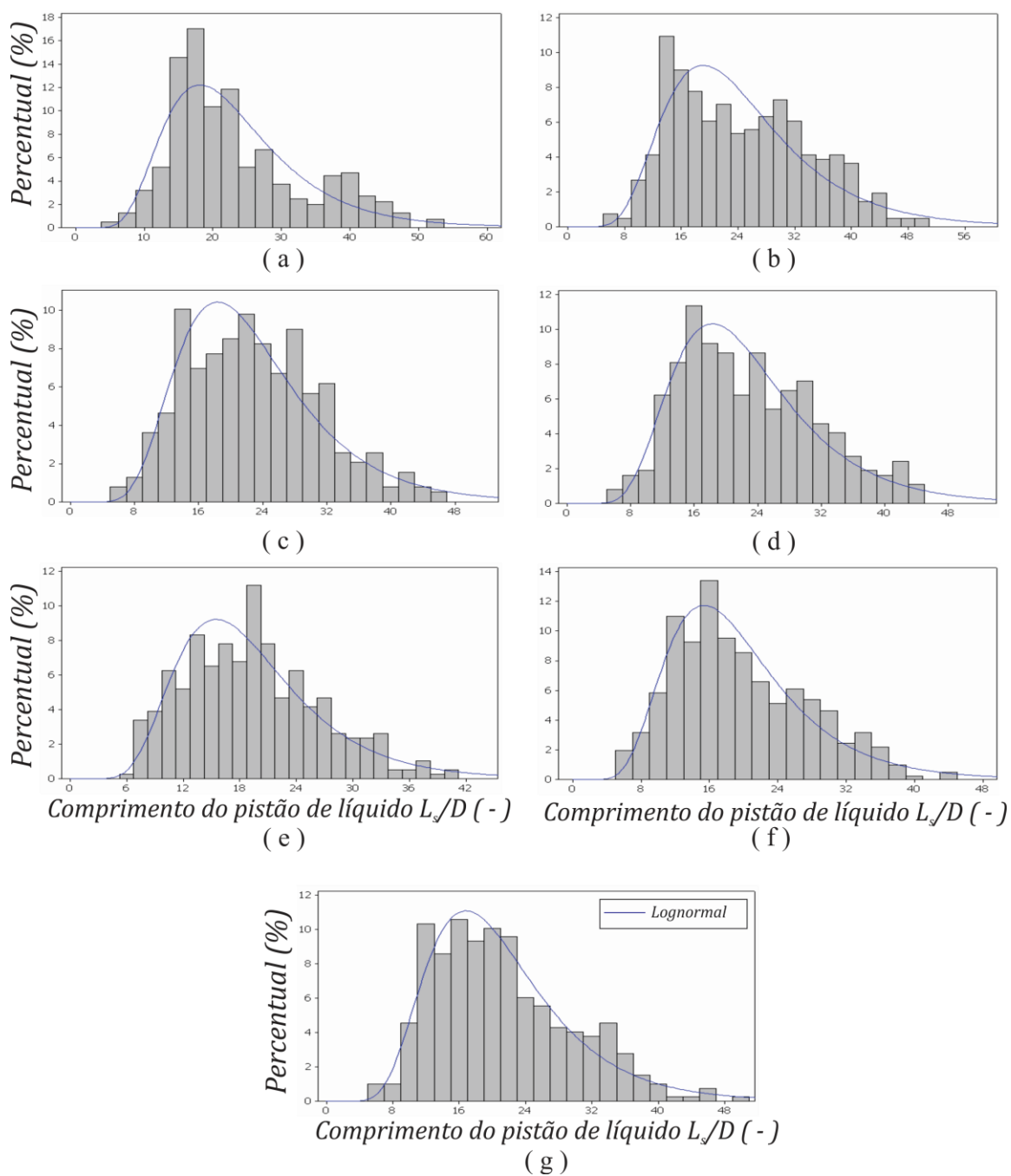


Figura A.5 - Histogramas do comprimento do pistão de líquido para a sub-matriz # 3.

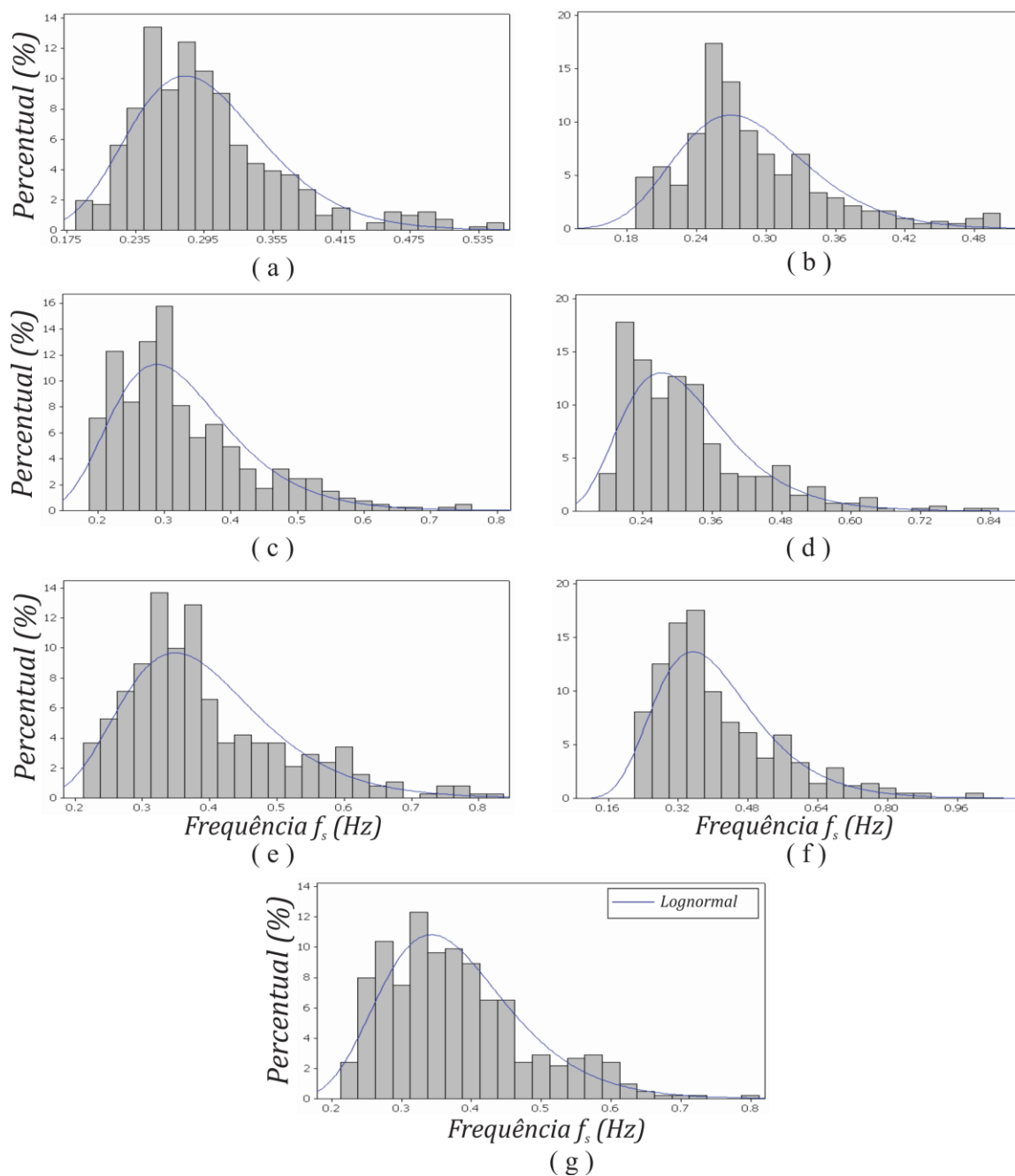


Figura A.6 - Histogramas da frequência de passagem dos pistões de líquido para a sub-matriz # 3.

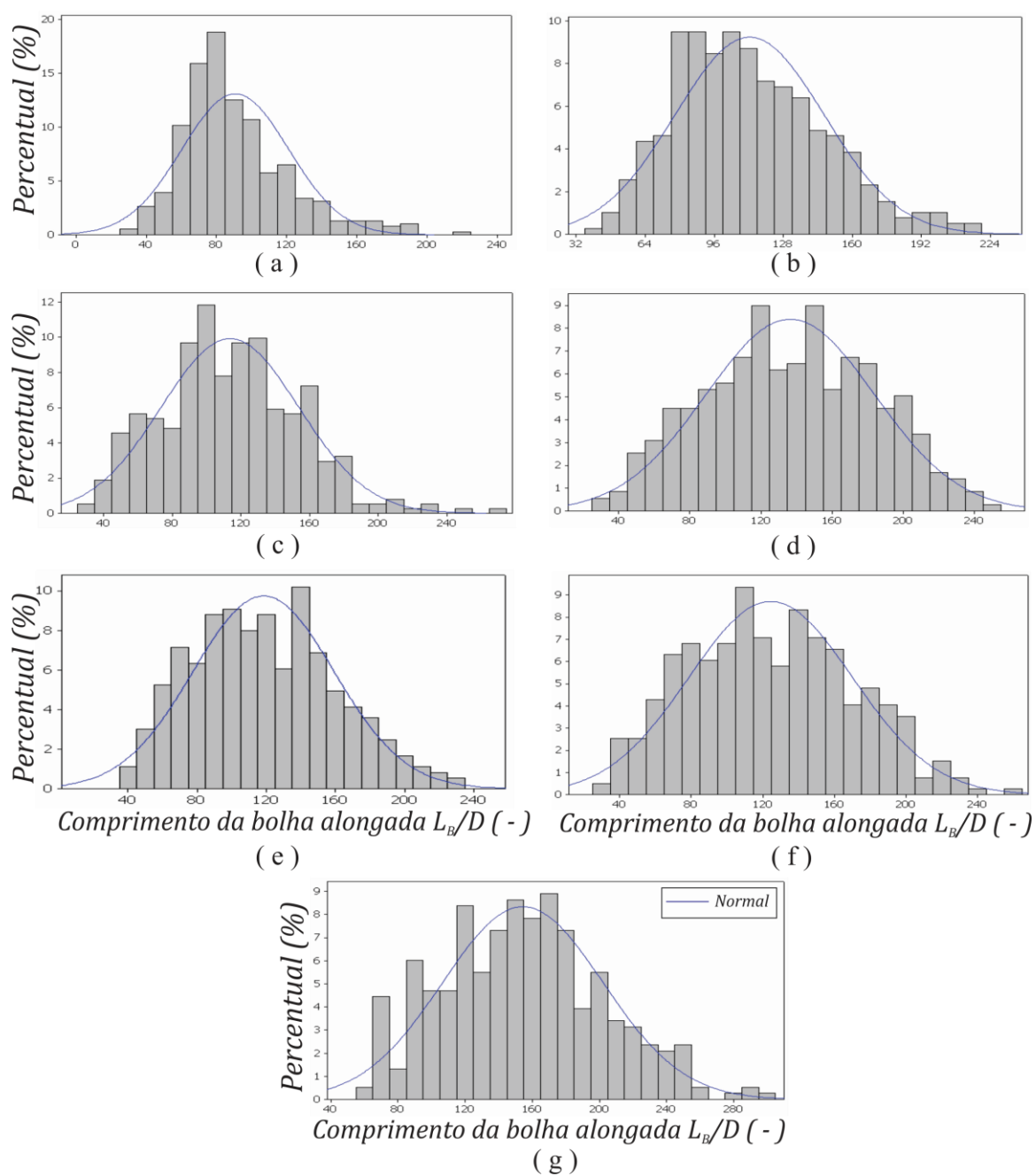


Figura A.7 - Histogramas do comprimento da bolha alongada para
a sub-matriz # 3.

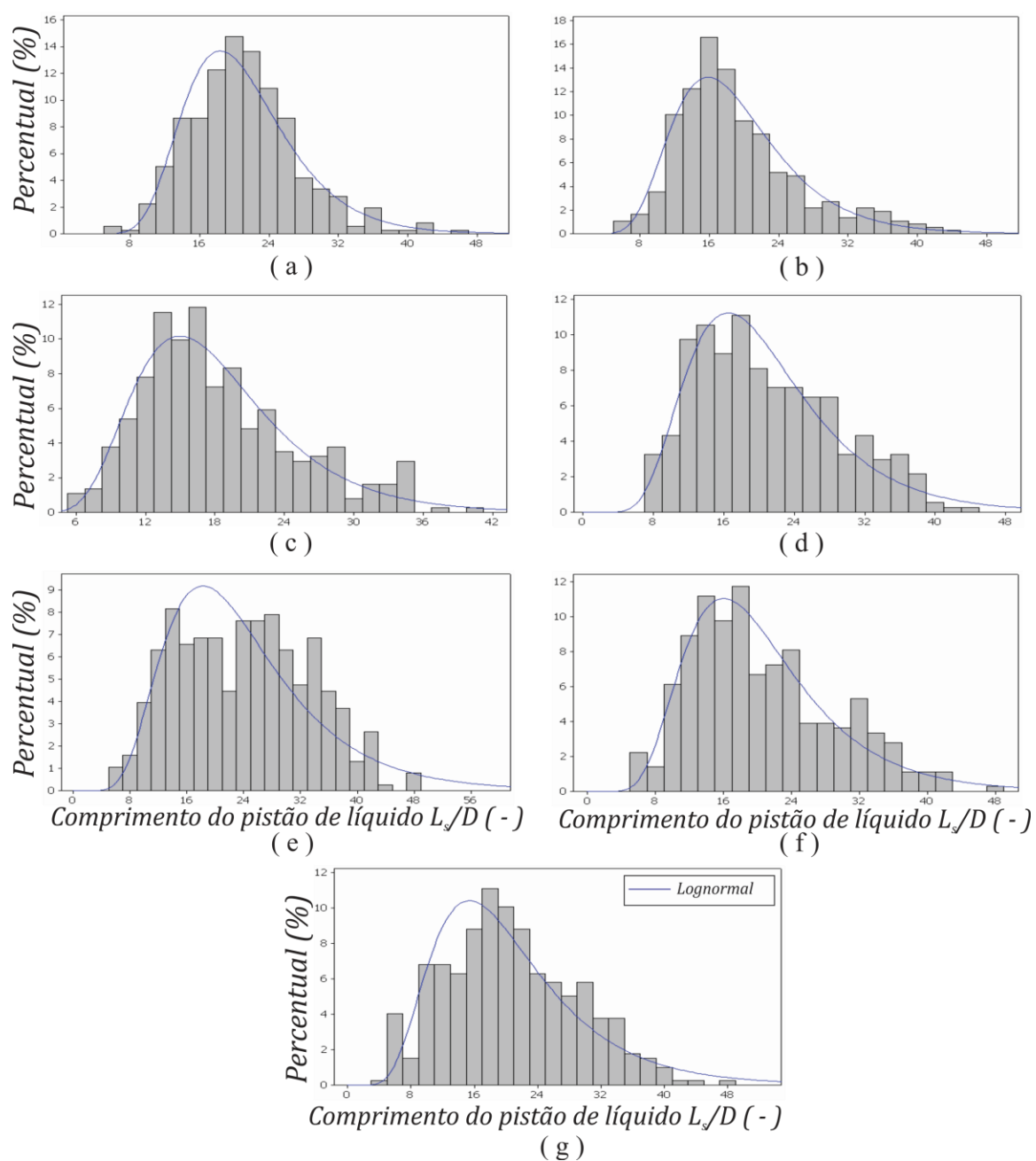


Figura A.8 - Histogramas do comprimento do pistão de líquido para a sub-matriz # 4.

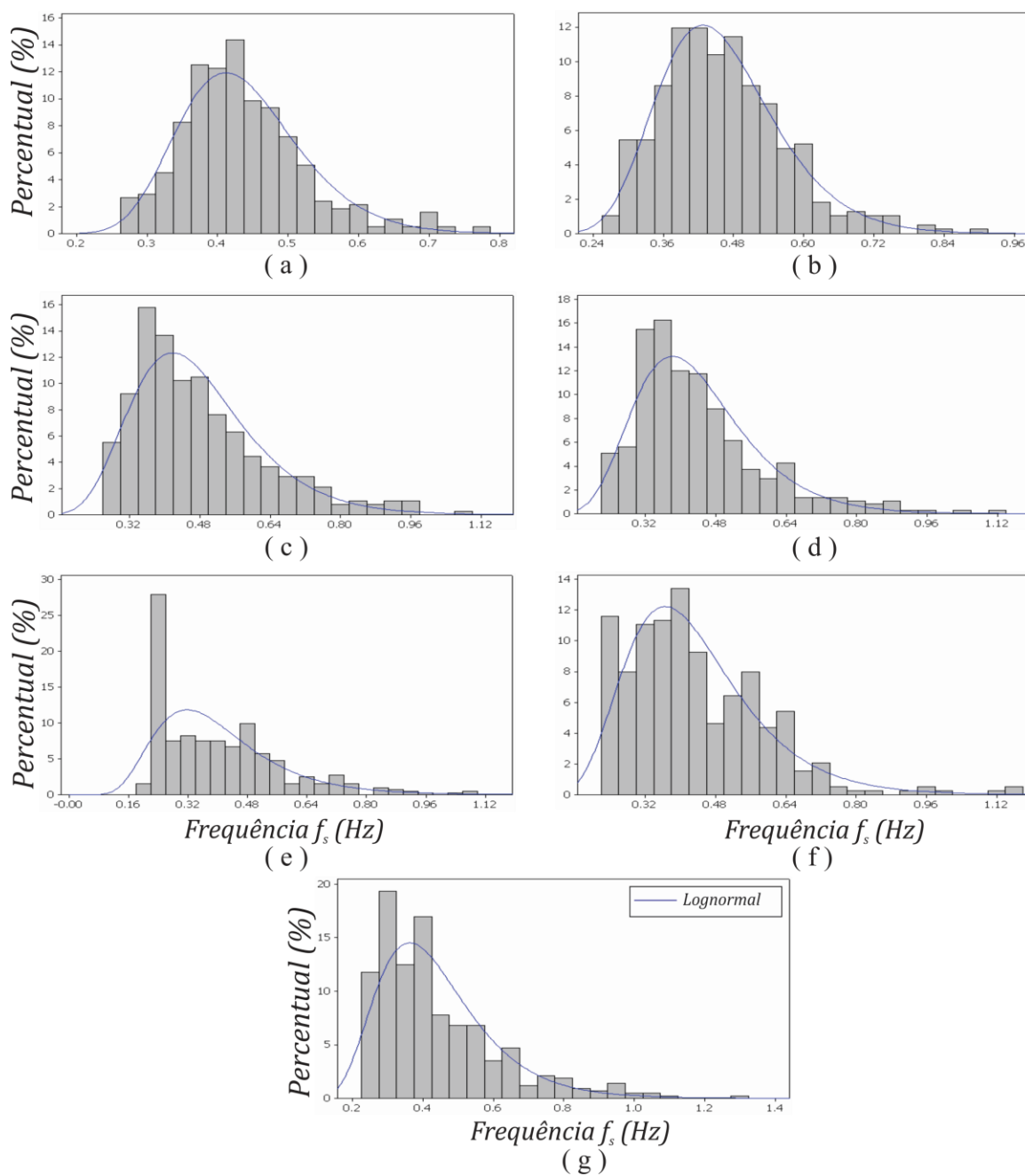


Figura A.9 - Histogramas da frequência de passagem dos pistões de líquido para a sub-matriz # 4.

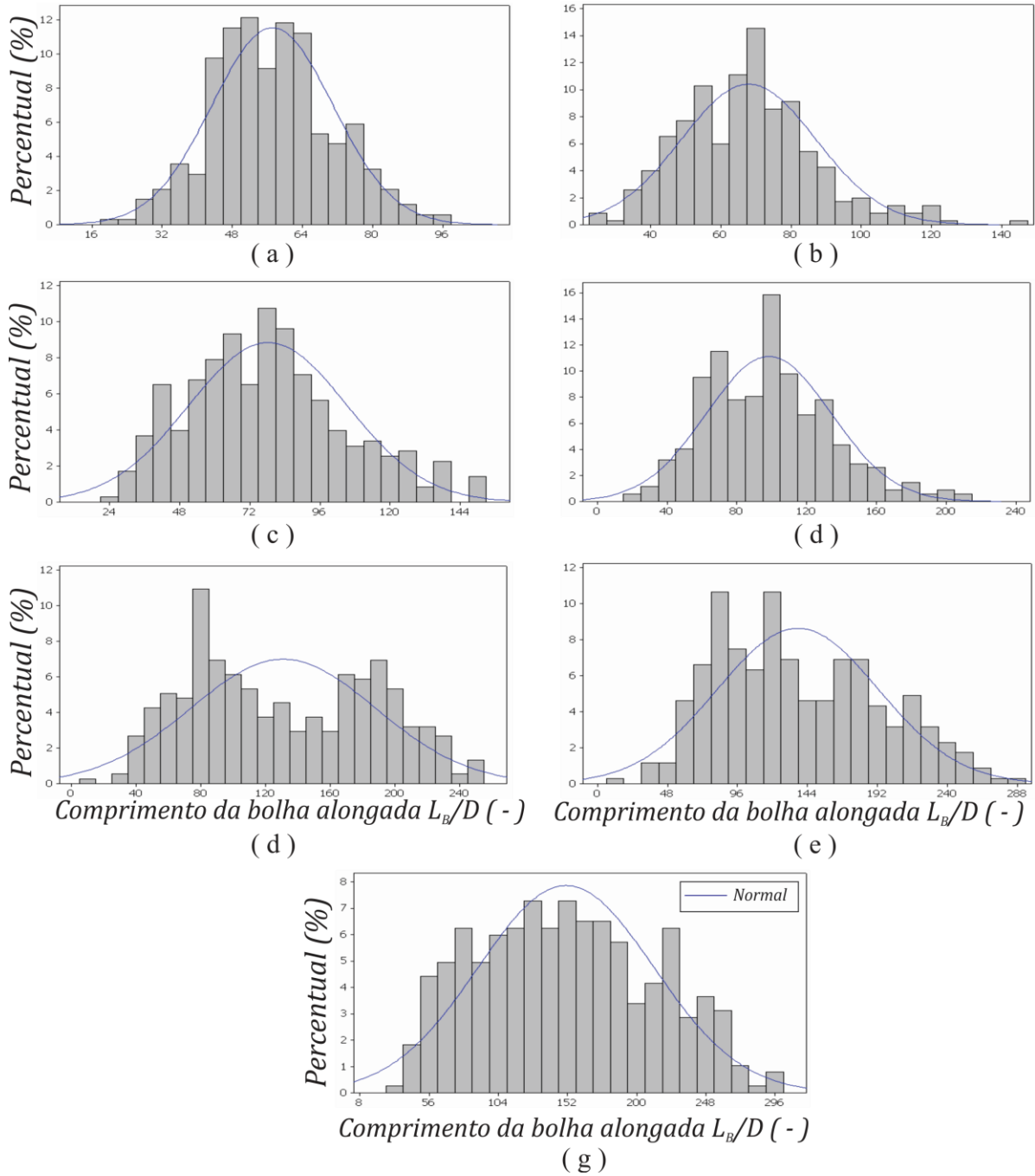


Figura A.10 - Histogramas do comprimento da bolha alongada para a sub-matriz # 4.

A.4.**Avaliação das incertezas nas variáveis medidas pelo processamento das imagens**

Como visto no Cap. 5 - Descrição da técnica de medição e processamento de imagens, a equação utilizada para o cálculo da velocidade da frente da bolha era dada por:

$$u_B = \frac{1}{c'} \frac{\Delta d_{imagens}}{\Delta t} \quad (5.1)$$

onde c' é o fator de calibração ($c' = 11 \text{ pixels/mm}$), $\Delta d_{imagens}$ é distância identificada pelo usuário em duas imagens consecutivas e Δt é o intervalo de tempo. Estimando a incerteza δu_B na medida da velocidade média da frente da bolha através da equação A.1., tem-se:

$$\delta u_B = \left[\left(\frac{u_B}{c'} \delta c' \right)^2 + \left(\frac{1}{c' \Delta t} \delta \Delta d \right)^2 + \left(\frac{u_B}{\Delta t} \delta \Delta t \right)^2 \right]^{1/2} \quad (A.10)$$

As incertezas individuais foram estimadas em $\delta c' = \pm 3 \text{ pixels/mm}$, $\delta \Delta t = \pm 1 \times 10^{-9} \text{ s}$ e $\delta \Delta d_{imagens} = \pm 15 \text{ pixels}$. Com esses valores a incerteza média estimada no cálculo da velocidade é de aproximadamente 5 %. As incertezas estimadas para cada par de velocidades superficiais de líquido e de gás encontram-se na tabela a seguir.

Sub-matriz # 1 ($j_L = 0,2 \text{ m/s}$)						
ponto	$j_G \text{ (m/s)}$	$u_B \text{ (m/s)}$	$\Delta L \text{ (mm)}$	$\Delta t \text{ (ms)}$	$\delta u_B \text{ (m/s)}$	$\delta u_B/u_B \text{ (\%)}$
1	0,7	1,368	27,358	20	0,077	5,569
2	0,9	1,565	31,189	20	0,084	5,008
3	1,1	1,807	36,001	20	0,094	4,509
4	1,3	2,144	42,776	20	0,107	4,030
5	1,5	2,352	46,909	15	0,155	5,080
6	1,7	2,647	39,516	15	0,134	4,228
7	1,9	2,856	33,899	15	0,119	3,740
Sub-matriz # 2 ($j_L = 0,3 \text{ m/s}$)						
1	0,7	1,471	29,738	20	0,081	5,270
2	0,9	1,667	31,189	20	0,084	4,703
3	1,1	2,012	30,122	15	0,110	5,151
4	1,3	2,197	32,975	15	0,117	4,826
5	1,5	2,461	36,915	15	0,127	4,450
6	1,7	2,658	26,611	10	0,151	5,700
7	1,9	2,784	27,592	10	0,155	5,480
Sub-matriz # 3 ($j_L = 0,4 \text{ m/s}$)						
1	0,7	1,666	25,250	15	0,098	6,006
2	0,9	1,843	27,686	15	0,103	5,522
3	1,1	2,154	32,608	15	0,116	4,907
4	1,3	2,459	36,920	15	0,127	4,452
5	1,5	2,692	32,189	12	0,144	4,891
6	1,7	2,923	29,581	10	0,162	5,298
7	1,9	3,202	31,552	10	0,170	4,910

Tabela A.5. - Estimativas de incerteza no cálculo da velocidade da frente da bolha através do processamento de imagens.

Sub-matriz # 4 ($j_L = 0,5 \text{ m/s}$)						
ponto	$j_G \text{ (m/s)}$	$u_B \text{ (m/s)}$	$\Delta L \text{ (mm)}$	$\Delta t \text{ (ms)}$	$\delta u_B \text{ (m/s)}$	$\delta u_B/u_B \text{ (\%)}$
1	0,7	1,652	25,143	15	0,097	6,051
2	0,9	2,009	30,321	15	0,110	5,166
3	1,1	2,193	33,019	15	0,117	4,835
4	1,3	2,475	37,406	15	0,129	4,442
5	1,5	2,682	40,348	15	0,136	4,204
6	1,7	3,066	29,684	10	0,163	5,054
7	1,9	3,301	32,912	10	0,175	4,814