

- LEGRAND, J.; PRUVOST, J.; LEGENTILHOMME, P.; FEUGA, A. M. Lagrangian trajectory model for turbulent swirling flow in an annular cell: comparison with residence time distribution measurements, Chemical Engineering Science, 57, p. 1205 – 1215, 2002.
- LOCKET, T. J. Numerical simulation of inelastic non-Newtonian fluid flow in annuli, Tese de Doutorado, University of London, Londres, 1992.
- LU, X. Y.; LIU, N. S. Large eddy simulation of turbulent flows in a rotating concentric annular channel, International Journal of Heat and Fluid Flow, 26, p. 378 – 392, 2005.
- KEE, D. D.; KIM, Y. D.; ZHU, H. Non-Newtonian fluids with a yield stress, Journal of non-Newtonian fluid mechanics, 129, p. 177 – 181, 2005.
- McCANN, R. C.; QUIGLEY, M. S.; ZAMORA, M.; SLATER, K. S. Effects of high-speed pipe rotation on pressures in narrow annuli, SPE Drilling & Completion, junho, p. 96 – 103, 1995.
- MAGLIONE, R. New method determines flow regime and pressure losses during drilling and cementing, Oil & Gas Journal, 93(36), p. 94 – 101, 1995.
- MAGLIONE, R.; GUARNERI, A.; FERRARI, G. Rheologic and hydraulic parameter integration improves drilling operations, Oil & Gas Journal, fevereiro, p. 44 – 48, 1999.
- MALISKA, C. R. Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional: fundamentos e coordenadas generalizadas, Rio de Janeiro, Editora LTC, 472 p., 1995.
- MANGLIK, R. M.; FANG, P.; JOG, M. A. Characteristics of laminar viscous shear-thinning fluid flows in eccentric annular channels, Journal of non-Newtonian Fluid Mechanics, 84, p.1 – 17, 1999.
- MARTINS, A. L. Modelagem e simulação do escoamento axial anular de mistura sólido-fluido não-Newtoniano em dutos horizontais e inclinados, Dissertação de Mestrado,

- Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Brasil, 102 p., 1990.
- MARTINS, A. L.; CAMPOS, W.; MARAVILHA, C.; SATINK, H. E BAPTISTA, J. M. Effect of non-Newtonian behaviour of fluids in the erosion of a cuttings bed in horizontal oilwell drilling, Hydrotransport, 14, p. 333 – 346, 1999.
- MARTINS, A. L.; ARAGÃO, A. F. L.; CALDERON, A.; LEAL, R. A. F.; MAGALHÃES, J. V. M.; SILVA, R. A. Hydraulic limits for drilling and completion long horizontal deepwater wells, SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium, Bakersfield, California, 16 – 18 março, 2004.
- MELO, F. R. G. Utilização de câmera de alta velocidade no estudo da dinâmica de esferas em líquidos, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil, 104 p., 2003.
- METZNER, A. B.; REED, J. C. Flow of non-Newtonian fluids – Correlation of laminar, transition and turbulet flow regions. AIChE Journal, 1, p. 434 – 440, 1955.
- MEURIC, O. F. J.; FISHER, K. A.; WAKEMAN, R. J.; CHIU, T. W. Numerical flow simulation of viscoplastic fluids in annuli, The Canadian Journal of Chemical Engineering, 76, p. 27 – 40, 1998.
- MEURIC, O. F. J.; FISHER, K. A.; WAKEMAN, R. J.; CHIU, T. W. Numerical modeling of cake formation and fluid loss from non-Newtonian muds during drilling using eccentric/concentric drill strings with/without rotation, Trans IChemE, 78, p. 707 – 714, 2000.
- MISHRA, P.; REED, J. C. Transition from laminar to turbulent flow of purely viscous non-Newtonian fluids in tubes, Chemical Engineering Science, 26, p. 915 – 920, 1971.
- MYERS, R. H. Response surface methodology. New York, Academic Press, 1976, 246 p.

- MOHANTY, A. K.; ASTHANA, S. B. L. Laminar flow in the entrance region of a smooth pipe, Journal of Fluid Mechanics, 90, p. 433 – 447, 1978.
- MORTON, K., BOMAR, B., SCHILLER, M., GALLET, J., AZAR, S., DYE, W., DAUGEREAU, K., HANSEN, N., OTTO, M., LEAPER, R.; SHOULTS, L. Selection and evaluation criteria for high-performance drilling fluids, SPE Annual Technical Conference, p. 1 – 13, Dallas, Texas, 9 a 12 outubro, 2005.
- MOWLA, R.; NADERI, A. Experimental study of drag reduction by a polymeric additive in slug two-phase flow of crude oil and air in horizontal pipes, Chemical Engineering Science, 61, p. 1549 – 1554, 2006.
- MÜLLER, A. J.; SÁEZ, A. E.; PÉREZ, R. M.; SIQUIER, S.; RAMÍREZ, N. Non-Newtonian annular vertical flow of sand suspensions in aqueous solutions of guar gum, Journal of Petroleum Science and Engineering, 44, p. 317 – 331, 2004.
- NEOFYTOU, P.; DRIKAKIS, D. Non-Newtonian flow instability in a channel with sudden expansion, Journal of non-Newtonian Fluid Mechanics, 111, p. 127 – 150, 2003.
- NOURI, J. M.; UMUR, H.; WHITELOW, J. H. Flow of Newtonian and non-Newtonian fluids in concentric and eccentric annuli, Journal of Fluid Mechanics, 253, p. 617 – 641, 1993.
- NOURI, J. M.; WHITELOW, J. H. Flow of Newtonian and non-Newtonian fluids in eccentric annulus with rotation of the inner cylinder, International Journal of Heat and Fluid Flow, 18, p. 236 – 246, 1997.
- OUDEMAN, P., BACARREZA, L. J. Field trial results of annular pressure behavior in a high-pressure / high-temperature well, SPE Drilling & Completion, junho, p. 84 – 88, 1995.
- OWEN, I.; FYRIPPI, I., ESCUDIER, M. P. Flowmetering of non-Newtonian liquids, Flow Measurement and Instrumentation, 15, p. 131 – 138, 2004.

- OZBAYOGLU, M. E.; MISKA, S. Z.; REED, T., TAKACH, N. Using foam in horizontal well drilling: a cutting transport modeling approach, Journal of Petroleum Science and Engineering, 46, p. 267 – 282, 2005.
- PAES, P.; AJIKOBI, F., CHEN, D. C. K. Challenges in drilling in Campos basin, SPE Annual Technical Conference, Dallas, Texas, 9 – 12 dezembro, 2005.
- PATANKAR, S. V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, New York, Hemisphere Publishing Corporation, 197 p., 1980.
- PEREIRA, F. A. R. Estudo do movimento de partículas em fluidos pseudoplásticos: coeficiente de arraste e efeito de parede, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil, 63 p., 1999.
- PINHO, F. T.; WHITELOW, J. H. Flow of non-Newtonian fluids in a pipe, Journal of non-Newtonian Fluid Mechanics, 34, p. 239 – 144, 1990.
- PLANK, J. P. Water based muds using synthetic polymers developed for high-temperature drilling, Oil & Gas Journal, 90, p. 40 – 45, 1992.
- PLLEHVART, A. A.; LARSEN, T. I.; AZAR, J. J. Development of a new cuttings-transport model for high-angle wellbores including horizontal wells, SPE Drilling & Completion, junho, p. 129 – 135, 1997.
- QUDAIHY, D. S.; AL-NUGHAIMISH, F. N.; SUNBUL, A. H.; ANSARI, A. A.; HENBLING, D. E.; AL-FARAJ, O. A.; VOLL, B. A. Improving horizontal-well productivity using novel technology and optimization of drilling fluid, SPE Drilling & Completion, setembro, p. 205 – 208, 2005.
- RAJU, K. V. S. N.; KRISHNAM D.; RAMADEVU, G.; REDDY, P. J.; YASSEN, M. Assessment of applicability of Carreau, Ellis and Cross models to the viscosity data of resin solutions, Journal of Applied Polymer Science, 48, p. 2101 – 2112, 1993.

- RAMADAN, A.; SKALLE, P.; JOHANSEN, S. T.; SVEIN, J.; SAASEN, A. Mechanistic model for cutting removal from solid bed in inclined channels, Journal of Petroleum Science and Engineering, 30, p. 129 – 141, 2001.
- RAMADAN, A.; SAASEN, A.; SKALLE, P. Application of the minimum transport velocity model for drag-reducing polymers, Journal of Petroleum Science and Engineering, 44, p.303 – 316, 2004.
- RAYN, N. W.; JOHNSON, M. M. Transition from laminar to turbulent flow in pipes, AIChE Journal, 5(4), p. 433 – 435, 1959.
- RENARDY, M. On the mechanism of drag reduction, Journal of non-Newtonian Fluid Mechanics, 59, p. 93 – 101, 1995.
- REYNOLDS, O. On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion, Philos. Trans. R. Soc., London, p.123 – 161, 1884.
- RICHARDSON, L. F. The approximate arithmetical solution by finite difference of physical problems involving differential equations, with an application to the stress in a masonry dam, Philos. Trans. Roy. Soc. London, 210, p. 307 – 357, 1910.
- RICHTMYER, R.; MORTON, K. Difference Methods for Initial Value Problems, New York, Cambridge University Press, 2nd edition, 1967, 239 p.
- ROBERTSON, R. E.; STIFF, H. A. An improved mathematical model for relating shear stress to shear rate in drilling fluids and cement slurries, Soc. Pet. Eng. Journal, 16(1), p. 31 – 36, 1976.
- RUDMAN, M. BLACKBURN, H. M.; GRAHAM, L. J. W.; PULLUM, L. Turbulent pipe flow of shear-thinning fluids, Journal of non-Newtonian Fluid Mechanics, 118, p. 33 – 48, 2004.

- SHARIF, M. A.; HUSSAIN, Q. E. Viscoplastic fluid flow in irregular eccentric annuli due to axial motion of the inner pipe, The Canadian Journal of Chemical Engineering, 75, p. 1028 – 1045, 1997.
- SHARIF, M. A.; HUSSAIN, Q. E. Numerical modeling of helical flow of pseudoplastic fluids, Numerical Heat Transfer, 38, p. 225 – 241, 2000.
- SHARIF, M. A.; HUSSAIN, Q. E. Numerical modeling of helical flow of viscoplastic fluids in eccentric annuli, AIChE Journal, 46, n. 10, p. 1937 – 1946, 2000.
- SHARMA, V. P.; MATHO, V. Rheological study of a water based oil well drilling fluid, Journal of Petroleum Science and Engineering, 45, p.123 – 128, 2004.
- SIFFERMAN, T. R.; MAYERS, G. M.; HADEN, E. L.; WAHL, H. A. Drill-cutting transport in full-scale vertical annuli, Journal of Petroleum Technology, novembro, p. 1295 – 1302, 1974.
- SIGINER, D. A.; BAKHTIYAROV, A. I. Flow of drilling fluids in eccentric annuli, Journal of non-Newtonian Fluid Mechanics, 78, p.119 – 132, 1998.
- SILVA, M.A.L., Simulação de Escoamentos Aerodinâmicos Turbulentos e Compressíveis, Usando os Modelos de Euler, de Navier-Stokes e o de Baldwin-Lomax, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 145p., 1996.
- SILVA, M. G. P.; MARTINS, A. L.; BARBOSA, B. C.; GARCIA, H. Designing fluid velocity profiles for optimal primary cementing, SPE Latin American Conference, Trinidad-Tobago, 23 a 26 abril, 1996.
- SPARLING, D. P.; WILLIAMSON, D. Mixed metal hidroxide mud improves drilling in unstable shales, Oil & Gas Journal, 89, p. 29 – 33, 1991.
- TALMON, A. M.; HUISMAN, M. Fall velocity of particles in shear flow of drilling fluids, Tunnelling and Underground Space Technology, 20, p. 193 – 201, 2005.

- TAN, K. K.; THORPE, R. B. Transient instability of the flow induced by an impulsively started rotating cylinder, Chemical Engineering Science, 58, p. 149 – 156, 2003.
- TEHRANI, A. A.; BITTLESTON, S. H.; LONG, P. J. G. Flow instabilities during annular displacement of one non-Newtonian fluid by another, Experiments in Fluids 14, p. 246 – 256, 1993.
- VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics : The Finite Volume Method Approach, Indiana, Prentice Hall, 272 p., 1996.
- WALTON, R. B.; BITTLESTON, S. H. The axial flow of a Bingham plastic in narrow eccentric annulus, Journal of Fluid Mechanics, 222, p. 39 – 60, 1991.
- XU, H.; KHATANIAR, S.; CHUKWU, G. A. Evaluation of rheological models and application to flow regime determination, Journal of Petroleum Science and Engineering, 11, p. 155 – 164, 1994.
- YASSEN, M.; HASEEBUDIN, S.; RAJU, K. V. S. N.; KRISHNA, D.; REDDY, P. J. Temperature dependence of viscosity of polyurethane polyol solutions: application on rheological models, Journal of Applied Polymer Science, 59, p. 29 – 36, 1996.
- ZAKHAROV, A. P.; KONOVALOV, E. A. Silicon-based additives improve mud rheology, Oil & Gas Journal, agosto, p. 61 – 64, 1992.

APÊNDICES

APÊNDICE A

GEOMETRIA CONE-PRATO DO VISCOSÍMETRO DE BROOKFIELD®

A geometria cone-prato mostrada na Figura A.1 é um arranjo experimental para medida de viscosidade e outras propriedades reológicas como tensão cisalhante e taxa de deformação. Para se estimar valores destas propriedades é necessário relacioná-las analiticamente com as variáveis inerentes à geometria do arranjo.

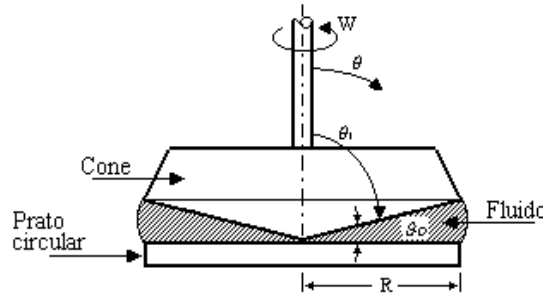


Figura A.1: Geometria cone-prato.

O ângulo θ_o é geralmente utilizado em instrumentos comerciais dentro da faixa de 0,5 a 8 graus. A simples análise da geometria faz uso do fato de que o ângulo θ_o é tão pequeno que uma aproximação pode ser aplicada, considerando o fluido localizado entre pratos paralelos. A partir desta constatação e trabalhando com as variáveis geométricas pode-se relacionar por exemplo a velocidade angular W e a componente $\theta\phi$ da taxa de deformação:

$$\dot{\gamma}_{\theta\phi} = \frac{\sin \theta}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{v_\phi}{\sin \theta} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} v_\phi = \frac{W}{\theta_o} \quad (\text{A.1})$$

sendo que $v_\phi = Wr \left(\frac{(\pi/2) - \theta}{(\pi/2) - \theta_1} \right)$

relação entre o torque e a componente $\theta\phi$ da tensão cisalhante :

$$\tau_{\theta\phi} = \frac{3T}{2\pi R^3} \quad (\text{A.2})$$

sendo que $T = \int_0^{2\pi} \int_0^R \tau_{\theta\phi} r^2 dr d\phi$ (A.3)

Relação dando a viscosidade em termos da velocidade angular W e o torque T :

$$\mu = \frac{\tau_{\theta\phi}}{-\dot{\gamma}_{\theta\phi}} = \frac{3T \theta_o}{2\pi R^3 W} \quad (\text{A.4})$$

Esta geometria foi utilizada durante os ensaios devido a sua precisão e ajuste a cada tipo de fluido.

O ajuste de *hit point* é um procedimento de re-calibração da distância ideal entre o cone e o prato do reômetro para determinações de propriedades reológicas. Para a aferição do viscosímetro inicia-se com o acoplamento do cone (*spindle*) ao eixo. Em seguida acopla-se o prato com o travamento pela haste fixadora. A Figura A.2 apresenta um esquema do posicionamento das partes descritas.

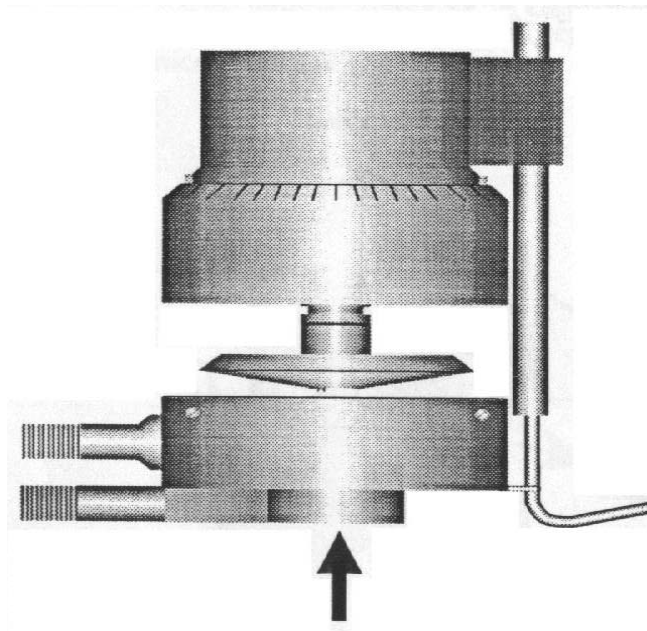


Figura A.2: Posicionamento do cone e prato do reômetro.

Inicia-se então a programação de acionamento para uma rotação de 10 RPM. Posiciona-se anel de ajuste com movimento no sentido horário pelo até o equipamento indicar a leitura de 0,0 na escala de torque (em porcentagem), conforme detalhes da Figura A.3. Na sequência realizam-se pequenos incrementos, de uma escala em relação a marca de referência, no anel de ajuste no sentido anti-horário. Deve-se aguardar entre movimentos um período de 6 segundos. Quando o *display* do equipamento registrar uma variação significativa para o torque (acima de 10 %) o ponto de toque ou *hit point* foi identificado. A seguir procede-se com o recuo de exatamente de uma escala no anel de ajuste. Com isso estará definido o espaçamento apropriado (0,013 mm) entre o cone e o prato para as determinações de viscosidade.

É recomendado pelo fabricante a aferição periódica do *hit point* visando manter o equipamento ajustado para determinações de viscosidade com variações inferiores a 5 %. Outra sugestão do fabricante é a aferição do equipamento com uso dos fluido padrão Brookfield.

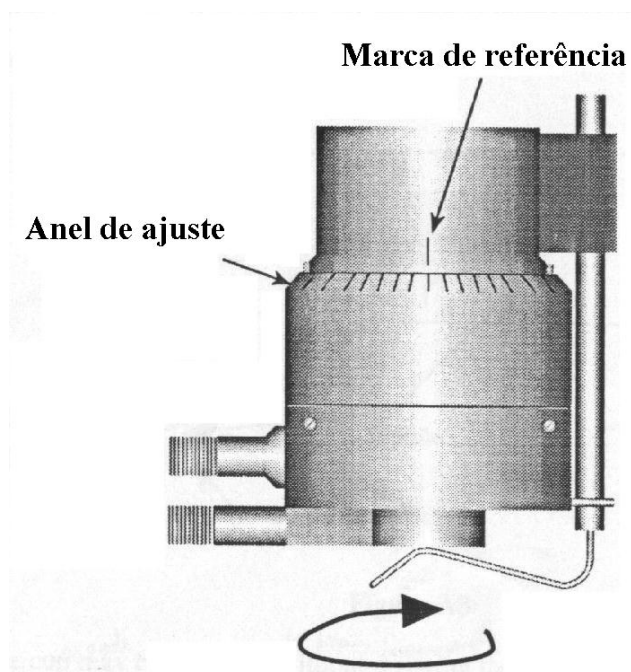


Figura A.3: Procedimento de incrementos no anel de ajuste para identificar o *hit point*.

APÊNDICE B

RESULTADOS DE SIMULADOS NUMÉRICA A PARTIR DAS
CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

Teste complementar com base no planejamento concêntrico para condição (15).

0,25 %; 1,2 m³/h e 0 RPM.

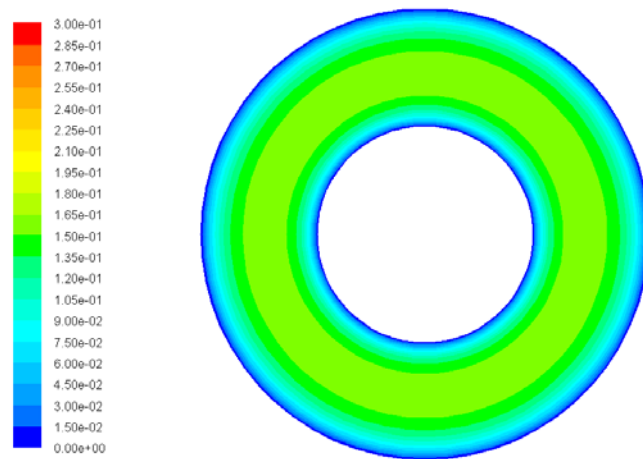


Figura B.1: Contornos de velocidade axial.

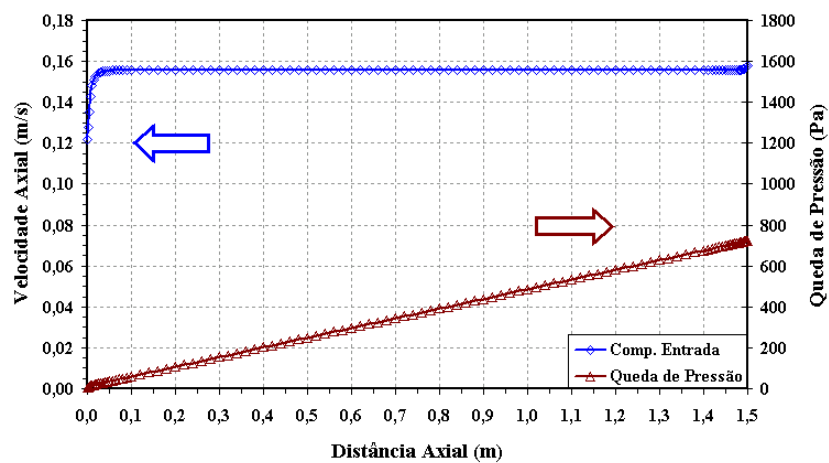


Figura B.2: Perfis axiais de comprimento de entrada e de queda de pressão.

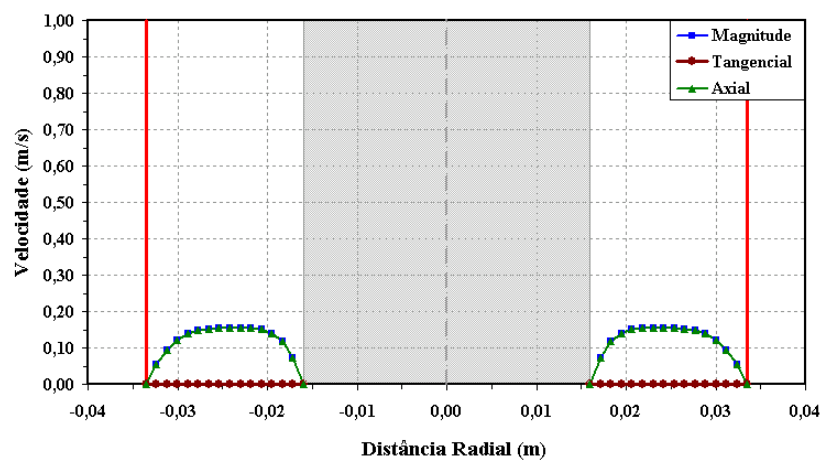


Figura B.3: Perfis radiais de velocidades.

Planejamento concêntrico para condição (15).

0,25 %; 1,2 m³/h e 300 RPM.

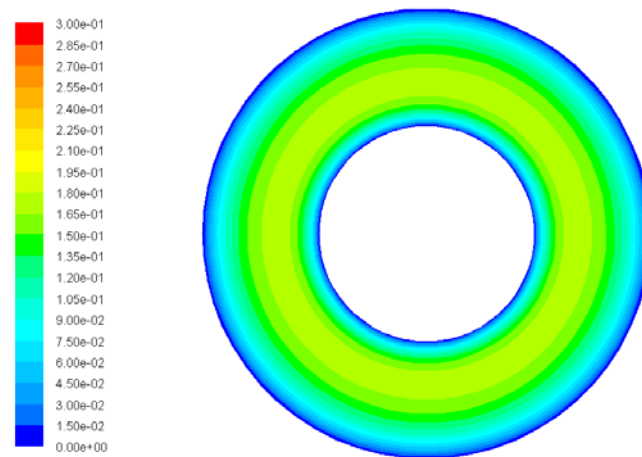


Figura B.4: Contornos de velocidade axial.

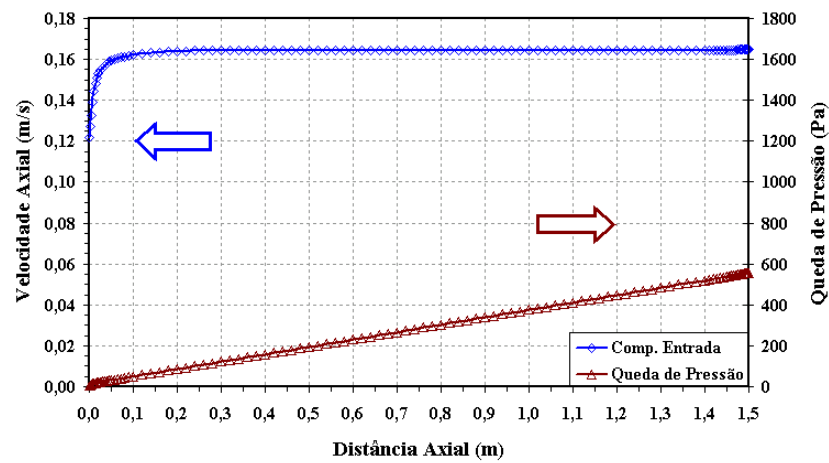


Figura B.5: Perfis axiais de comprimento de entrada e de queda de pressão.

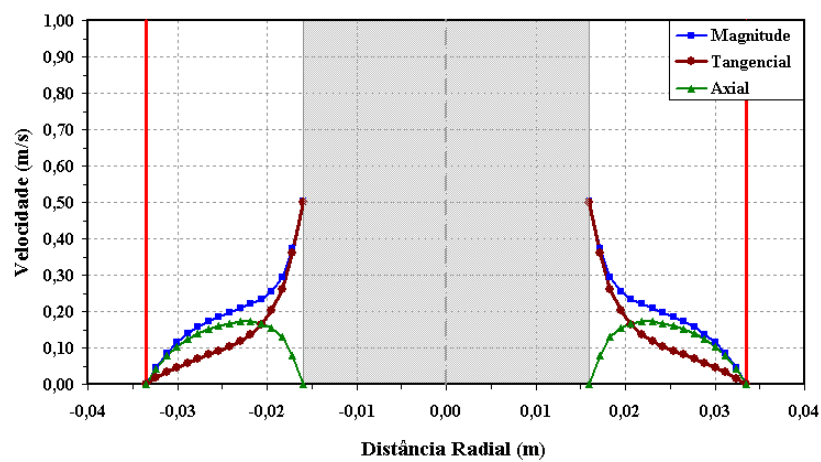


Figura B.6: Perfis radiais de velocidades.

Teste complementar com base no planejamento concêntrico para condições (1) e (7).
 0,31 %; 0,6 m³/h e 0 RPM.

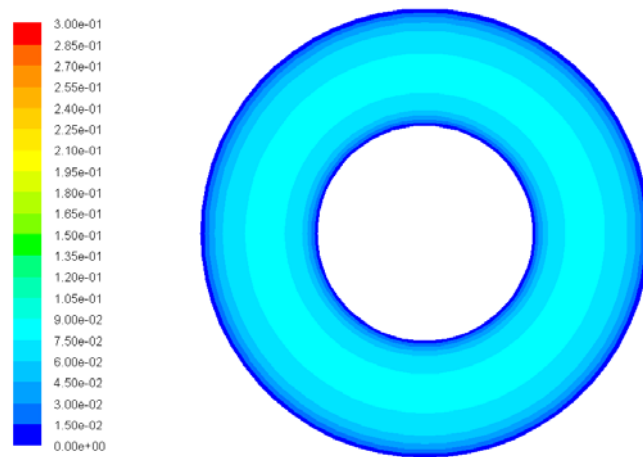


Figura B.7: Contornos de velocidade axial.

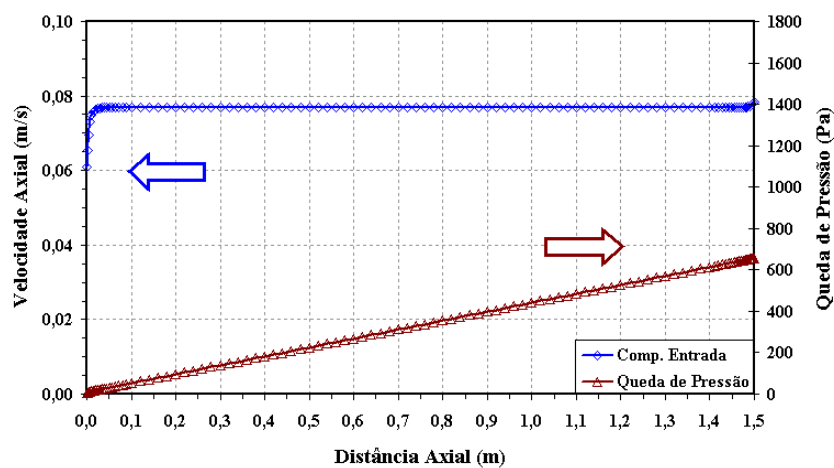


Figura B.8: Perfis axiais de comprimento de entrada e de queda de pressão.

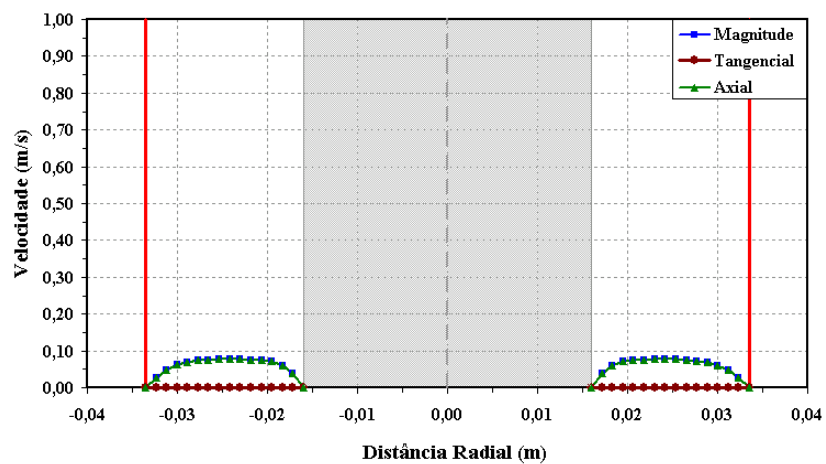


Figura B.9: Perfis radiais de velocidades.

Planejamento concêntrico para condição (1).

0,31 %; 0,6 m³/h e 120 RPM.

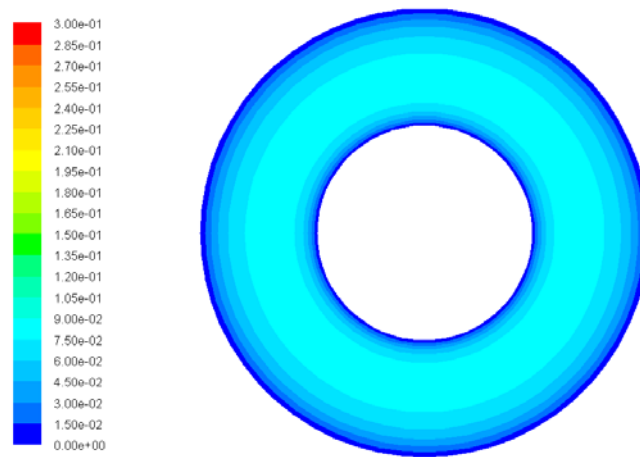


Figura B.10: Contornos de velocidade axial.

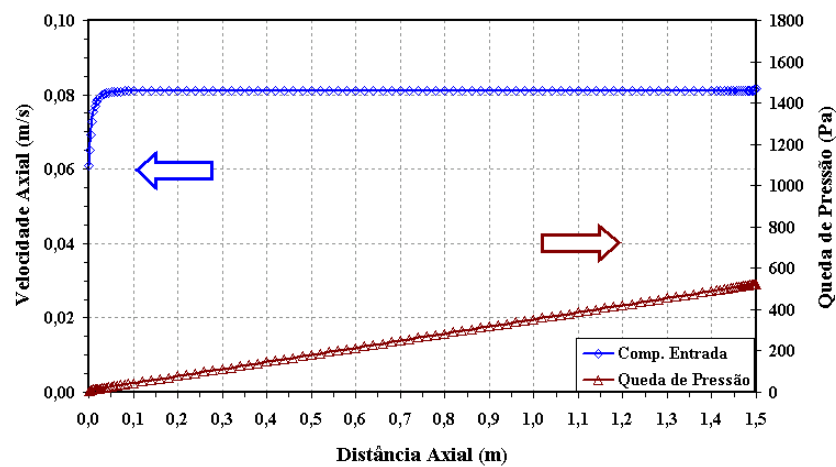


Figura B.11: Perfis axiais de comprimento de entrada e de queda de pressão.

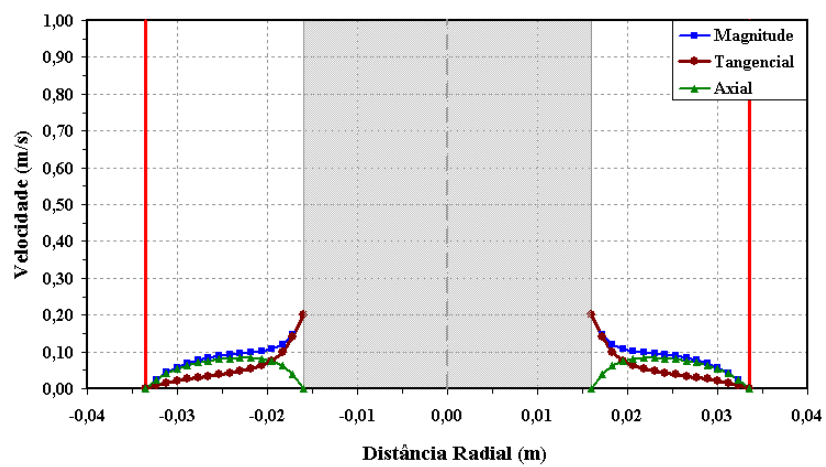


Figura B.12: Perfis radiais de velocidades.

Planejamento concêntrico para condição (7).

0,31 %; 0,6 m³/h e 480 RPM.

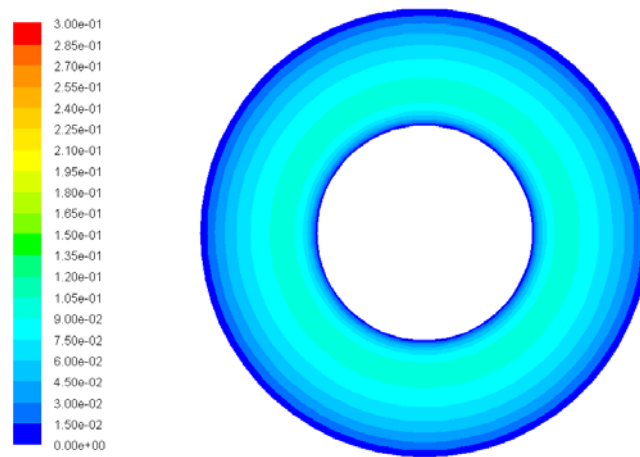


Figura B.13: Contornos de velocidade axial.

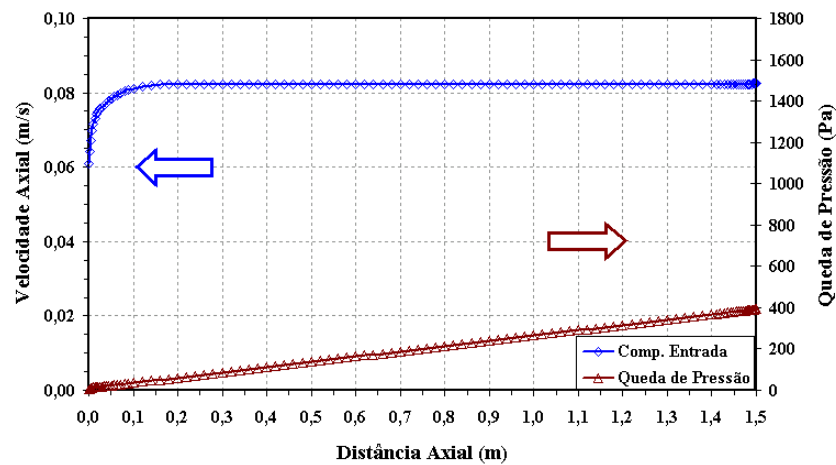


Figura B.14: Perfis axiais de comprimento de entrada e de queda de pressão.

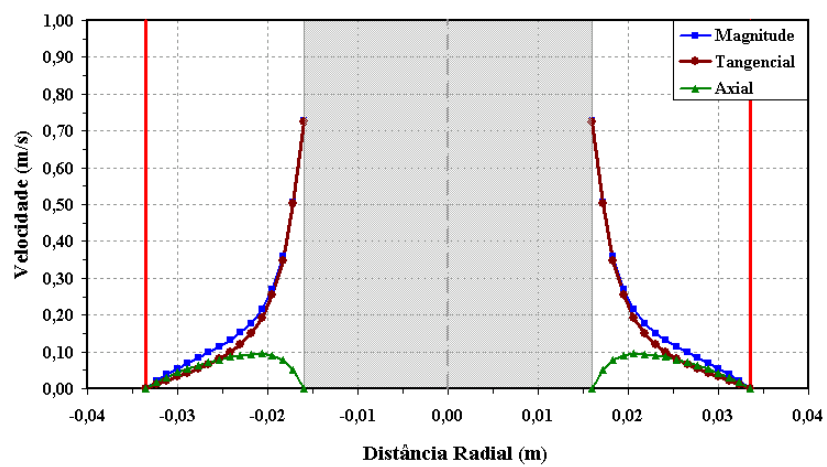


Figura B.15: Perfis radiais de velocidades.

Teste complementar com base no planejamento concêntrico para condições (4) e (8).
 0,31 %; 1,8 m³/h e 0 RPM.

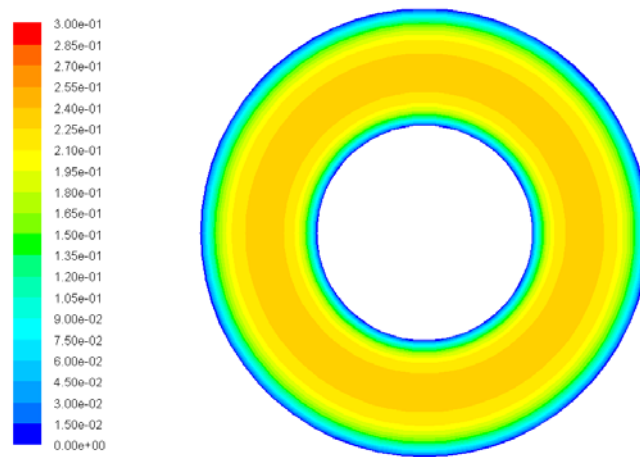


Figura B.16: Contornos de velocidade axial.

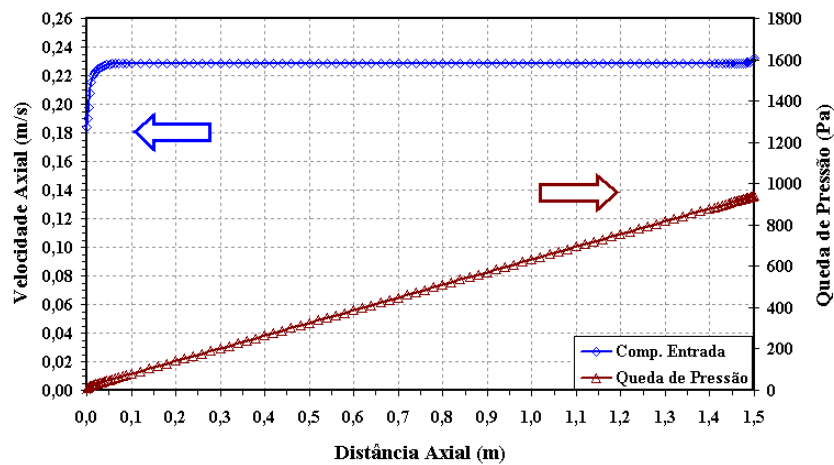


Figura B.17: Perfis axiais de comprimento de entrada e de queda de pressão.

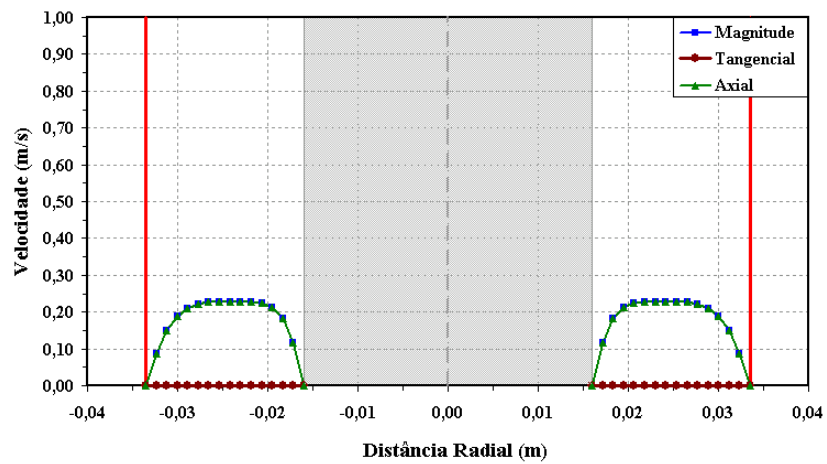


Figura B.18: Perfis radiais de velocidades.

Planejamento concêntrico para condição (8).

0,31 %; 1,8 m³/h e 120 RPM.

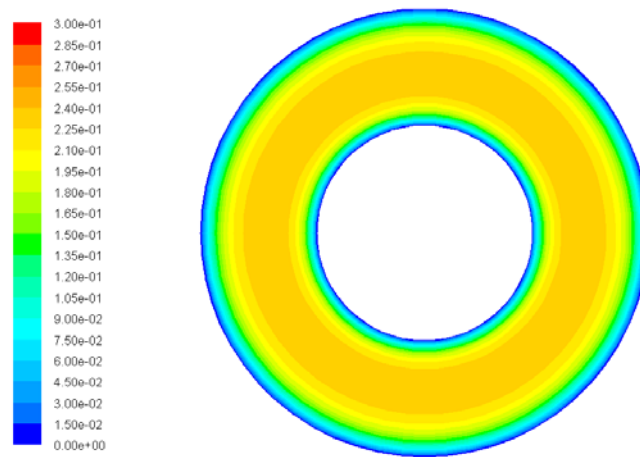


Figura B.19: Contornos de velocidade axial.

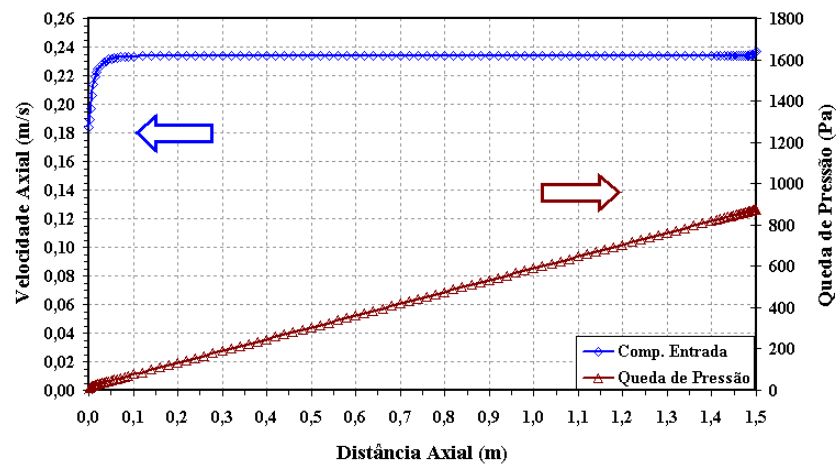


Figura B.20: Perfis axiais de comprimento de entrada e de queda de pressão.

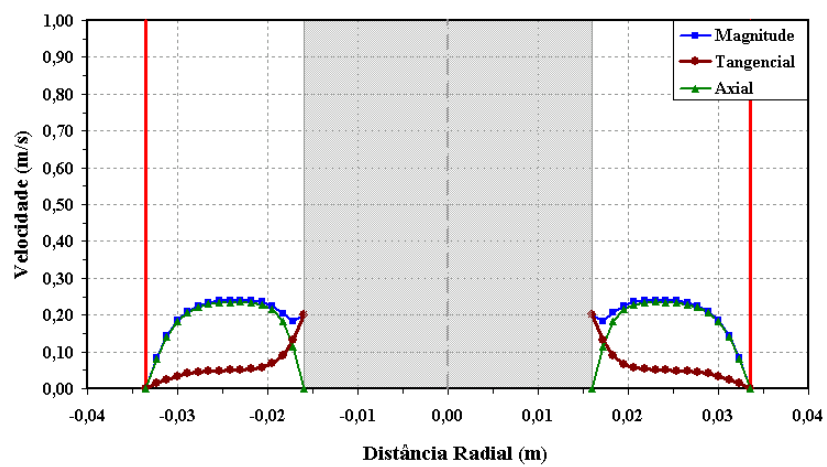


Figura B.21: Perfis radiais de velocidades.

Planejamento concêntrico para condição (4).

0,31 %; 1,8 m³/h e 480 RPM.

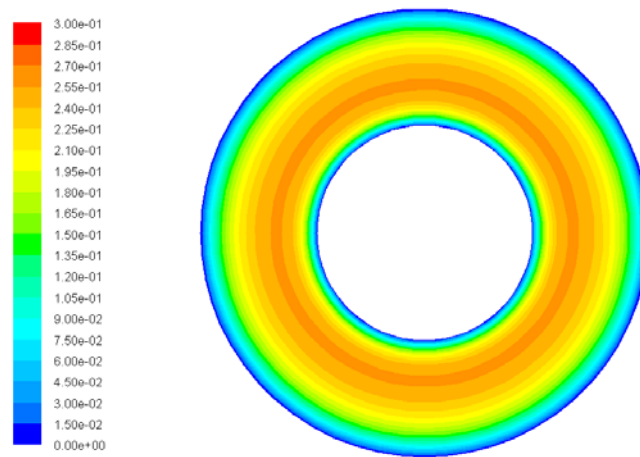


Figura B.22: Contornos de velocidade axial.

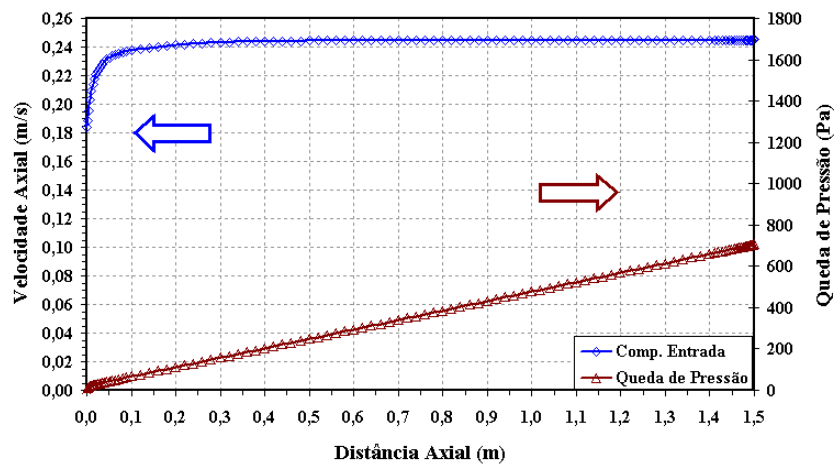


Figura B.23: Perfis axiais de comprimento de entrada e de queda de pressão.

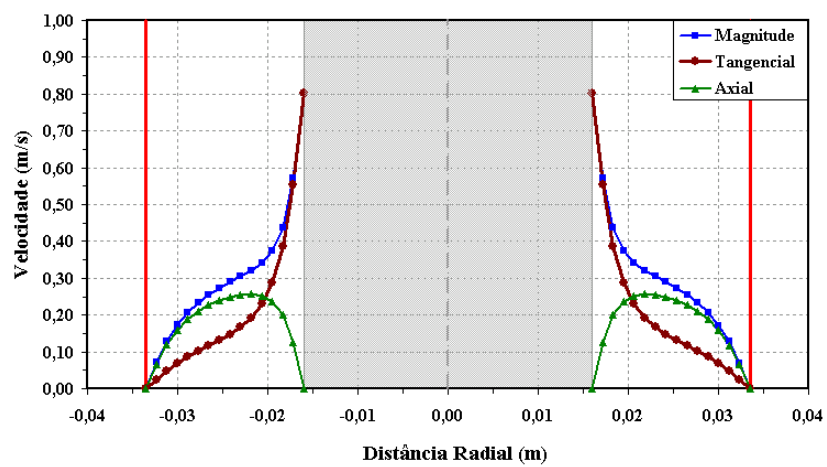


Figura B.24: Perfis radiais de velocidades.

Teste complementar com base no planejamento concêntrico para condição (11).

0,40 %; 0,2 m³/h e 0 RPM.

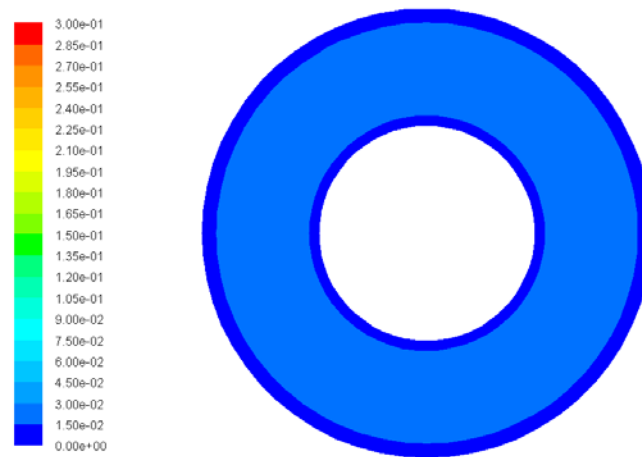


Figura B.25: Contornos de velocidade axial.

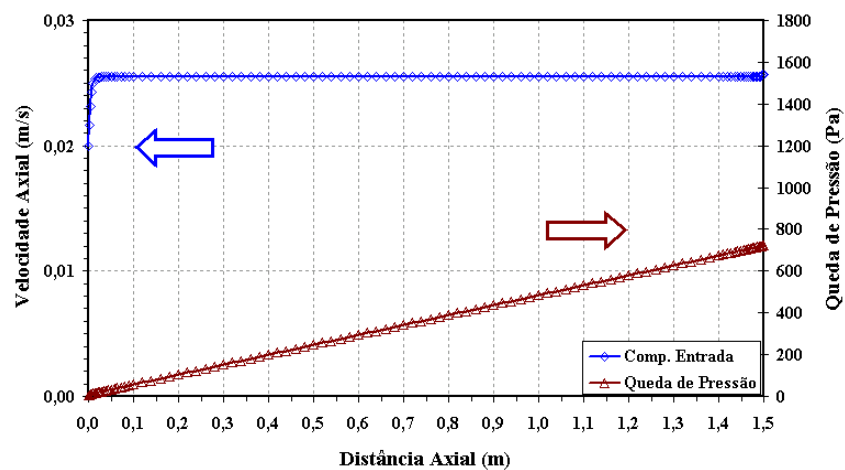


Figura B.26: Perfis axiais de comprimento de entrada e de queda de pressão.

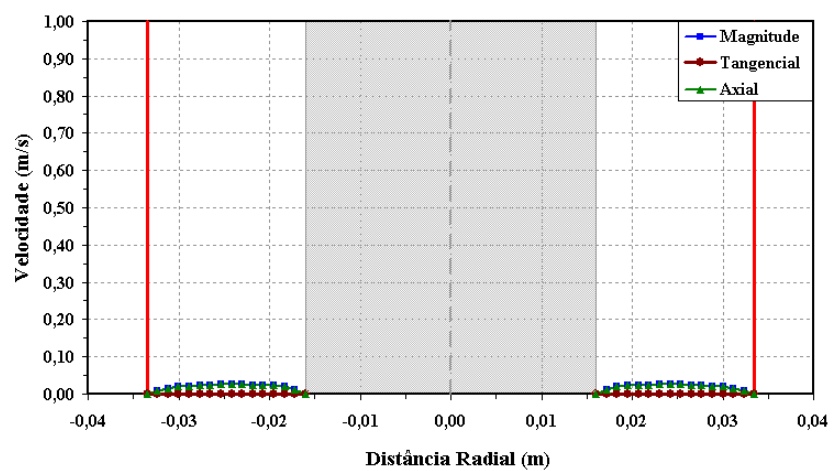


Figura B.27: Perfis radiais de velocidades.

Planejamento concêntrico para condição (4).

0,40 %; 0,2 m³/h e 300 RPM.

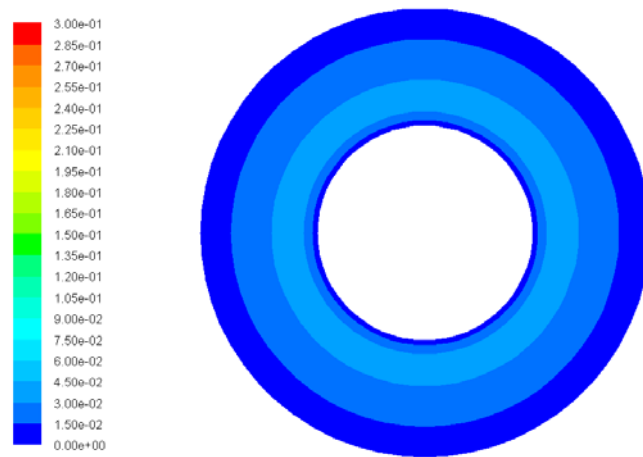


Figura B.28: Contornos de velocidade axial.

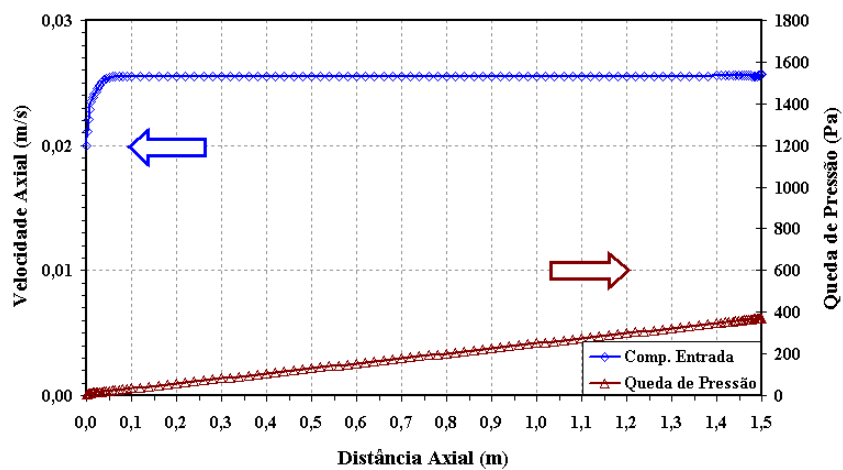


Figura B.29: Perfis axiais de comprimento de entrada e de queda de pressão.

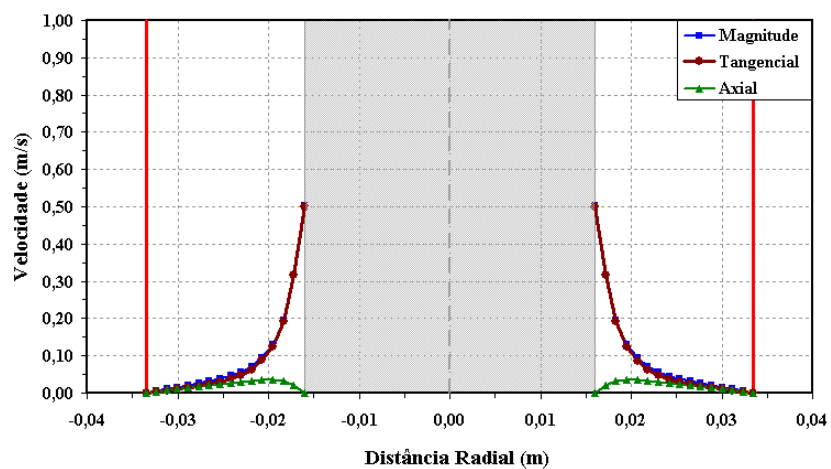


Figura B.30: Perfis radiais de velocidades.