

## Referências Bibliográficas

AGUIRRE, J.A.; PALADINO, E.E.; REIS, M.; MORAES, C.A.C.; de MELO, D.C.; CFD Modeling of hydrocyclone flows, CFD-Oil 2006

AVEROUS J.; FUENTES R.; Advances in the numerical simulation of hydrocyclone classification. Canadian Metallurgical Quaterly, vol 36 no 5 pp 309-314, 1997

BHASKAR, K. U.; MURTHY, Y. R.; RAJU, M. R.; TIWARI, S.; SRIVASTAVA, J. K.; RAMAKRISHNAN, N.; CFD simulation and experimental validation studies on hydrocyclone. Minerals Engineering, 20 (2007) 60-71

BRENNAN, M.S.; NARASIMHA, M.; HOLTHAM, P.N.; Multiphase modelling of hydrocyclones – prediction of cut-size. Minerals Engineering 20 (2007) 395-406.

CECEBI, T.; BRADSHAW, P.; Momentum Transfer in Boundary Layers. Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1977.

CHANGIRWA R.; ROCKWELL M.C.; FRIMPONG S.; SZYMANSKI J., Hybrid Simulation for Oil-Solids-Water Separation in Oil Sands Production, Minerals Engineering, 12 (12), 1999, 1459-1468, Elsevier Science

CHEN, C.S.; CHANG, K. C.; Modification of the  $k-\varepsilon$  turbulence model for swirling recirculating flow in a pipe expansion. International Journal of Computational Fluid Dynamics 5, 263-279, 1995

CHINÉ, B.; CONCHA, F. Flow patterns in conical and cylindrical hydrocyclones, Chemical Engineering Jornal, 80, 2000, 267-273.

COKLJAT, D.; SLACK, M.; VASQUEZ, S.A.; BAKKER, A.; MONTANTE, G. Reynolds-Stress Model for Eulerian multiphase. Progres in Computational Fluid Dynamics, vol 6, n.s 1/2/3, pp 168-178, 2006

CORTÉS, C.; GIL, A.; Modelling the gas and particle flow inside cyclone separators. *Progress in Energy and Combustion Science*, 33 (2007) 409-452, 2007

CULLIVAN, J.C.; WILLIAMS, R.A.; DYAKOWSKI, T.; CROSS C.R.; New understanding of a hydrocyclone flow field and separation mechanism from computational fluid dynamics. *Minerals Engineering*, 17 (2004) 651-660

DAÍ, G.Q.; LI, J.M.; CHEN, W.M., Numerical Prediction of the liquid flow within a hydrocyclone. *Chemical Engineering Journal* 74 (1999) 217-223

DELGADILLO, J.A.; RAJAMANI, R. K.; A comparative study of three turbulence-closure models for the hydrocyclone problem. *Int. J. Miner. Process.* 77 (2005) 217-230

DIRKZWAGER, M.; A new axial cyclone design for fluid-fluid separation. Ph.D. thesis, Delft University of technology, Netherlands, 1996

Van DOORMAAL, J.P.; RAITHBY, G.D.; Enhancements of the SIMPLE method for predicting incompressible fluid flows. *Numerical Heat Transfer* 7, 147-163.

FLUENT v.6.3.26 , Ansys 2006. Manual do usuário.

GAIDUZHEVICH, V.; AKHSANOV, R.; SAFIN, R.; ISMAGILOV, F.; ISMAGILOVA, Z., 2006, Gasoline production in stabilization of feedstock in hydrocyclones, *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 42 (1), 3-9, Springer

GRADY, S. A.; WESSON, G. D.; ABDULLAH, M; KALU, E. E.; Prediction of 10mm hydrocyclone separation efficiency using computational fluid dynamics. *Researcharticle*, 41-46, 2003.

GROTJANS, H, Application of higher Order Turbulence Models to Cyclone flows. *Zyklonabscheider in der Energie- und Verfahrenstechnik*, Fachtagung Leverkusen, VDI-Verlag, VDI-Berichte 1511, p. 175, 1999

HARTLEY, C.D., Measurement of flow velocities within a hydrocyclone using laser Doppler anemometry. Technical Report FTN/X/82, AEA, Power Fluidics, BNFL (1994)

HINZE, J.O., 1975, Turbulence. McGraw-Hill Publishing Co., New York.

HUANG, S, Numerical simulation of oil-water hydrocyclone using Reynolds-stress model for Eulerian multiphase flows, Canadian Journal of Chemical Engineering vol. 83, no.5, 829-834, 2005.

HUSVEG, T.; RAMBEU, O.; DRENGSTIG, T.; BISTAD, T.; 2007, Performance of deoiling hydrocyclone during variable flow rates. Minerals Engineering. 20 (4), pp. 368-379.

HUTCHINSON, B. R.; RAITHEY, G. D.. A Multigrid Method Based on the Additive Correction Strategy. Numerical Heat Transfer, 9:511-537, 1986

KIM, S.-E.; CHOUDHURY, D. A Near-Wall Treatment Using Wall Functions Sensitized to Pressure Gradient. In ASME FED Vol. 217, Separated and Complex Flows. ASME, 1995.

LAUNDER, B.E.; REECE, G.J.; RODI, W., Progress in development of a Reynolds-stress turbulence closure, J. Fluid Mechanics, 68, 537-566 (1975)

LEONARD, B.P.; A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 19, 58-98, 1979

LIEN F.S.; LESCHZINER, M.A.; Assessment of Turbulent Transport Models Including Non-Linear RNG Eddy-Viscosity Formulation and Second-Moment Closure. Computers and Fluids, 23(8):983-1004, 1994.

LIU, Z.; ZHENG, Y.; JIA, L.; JIAO, J.; ZHANG, Q., Stereoscopic PIV studies on the swirling flow structure in a gas cyclone. Chemical Engineering Science 61 (2006) 4252 – 4261

MARINS, L. P. Caracterização experimental do escoamento no interior de um hidrociclone sem núcleo gasoso, Dissertação de mestrado, UFRJ, 2007

MATVIENKO O.V., 2004, Analysis of Turbulence Models and Investigation of the Structure of the Flow in a Hydrocyclone, Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 77 (2), 316-323, Springer

MELO M.V.; SANT'ANNA JR G.L.; MASSARANI G., 2003, Flotation Techniques for Oily Water Treatment, *Environmental Technology*, 24 (7), 867-876, Selper Ltd

MONTAVON, C.A.; GROTHJANS, H.; HAMILL, I.S., PHILLIPS, H.W.; JONES, I.P., Mathematical modeling and experimental validation of flow in a cyclone, Abstract for BHR Conference on Cyclone Technologies, Warnick 31 May-2 June, 2000

MORAES, C.A.C., 1994. Modelo fluidodinâmico para a estimativa de eficiência em hidrociclones para águas oleosas. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ

MONREDON, T.C.; HSIEH, K.T.; Rajamani, R.K., Fluid flow model of the hydrocyclone: an investigation of device dimensions. *International Journal of Mineral Processing* 35, 65–83, (1992).

MURPHY, S.; DELFOS R., POURQUIE, M.J.B.M.; OLUJIC, Z.; JANSENS, P.J.; NIEUWSTADT, F.T.M.. Prediction of strongly swirling flow within an axial hydrocyclone using two commercial CFD codes, *Chemical Engineering Science*, 62 (2007) 1619-1635

a) NARASIMHA, M.; BRENNAN, M. S.; HOLTHAM, P. N., A Review of Flow Modeling for Dense Medium Cyclones, *Coal Preparation*, 26 (2), 55-89, 2006, Taylor and Francis Ltd

b) NARASIMHA, M.; BRENNAN, M. S.; HOLTHAM, P. N., Large eddy simulation of hydrocyclone- prediction of air-core diameter and shape. *Int. J. Miner. Process.*, 80 (2006) 1-14

NOWAKOWSKI, A.F; CULIVAN J.C.; WILLIAMS R.A; DYAKOWSKI T.; Application of CFD to modelling of the flow in hydrocyclones. Is this a realizable option or still a research challenge? *Minerals Engineering*, 17 (2004) 661-669

OLSON, T.J., VAN OMMEN, R., Optimizing hydrocyclone design using advanced CFD model, *Minerals Engineering*, Vol. 17, pp. 713-720, 2004

PATANKAR, S. V. Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere

publishing Corporation, 1980.

PERRY, H.R.; GREEN; D.W.; Perry's Chemical engineers' handbook, 7th Edition, 1999

RAPOSO, G.M.; MORAES, C.A.C.; MARINS, L.P.M.; AGUIRRE, J.A.; NIECKELE, A.O.; High Oil Content Hydrocyclone – Numerical flow simulation. CFD-Oil, August 18-19, 2008

SLACK, M.D.; DEL PORTE, S.; ENGELMAN, M.S.; Designing Automated Computational Fluid Dynamics Modelling Tools for Hydrocyclone Design, 2003.

SMAGORINSKY, J.; General Circulation Experiments with the Primitive Equations. I. The Basic Experiment. Month. Wea. Rev., 91:99-164, 1963.

SPEZIALE, C.G.; SAKAR, S.; GATSKI, T.B., Modelling the pressure strain correlation of turbulence: an invariant dynamical systems approach. J. Fluid Mech, 227, 245-272 (1991)

SRIPRIYA, R.; KAULASKAR, M.D.; CHAKRABORTY, S.; MEIKAP, B.C. Studies on the performance of a hydrocyclone and modeling for flow characterization in presence and absence of air core. Chemical Engineering Science 62 (2007) 6391-6402.

YABLONSKII, V., 2006, Effect of structural parameters of hydrocyclones on the extraction of solid suspension particles by pressurized flotation, Chemical and Petroleum Engineering, 42 (3-4), 119-127, Springer

YAKHOT, V.; ORSZAG, S.A.; THANGAM, S.; GATSKI, T.B.; SPEZIALE, C.G.; Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. Phys. Fluids A 4 (7), July 1992

YOUNG, G.A.B; WAKLEY, W.D.; TAGGART, D.L.; ANDREWS, S.L ; WORRELL, J.R., Oil-water separation using hydrocyclones: An experimental search for optimum dimensions. Journal of Petroleum Science and Engineering, 11, 1994, 37-50.

WANG, B.; YU, A. B., Numerical study of particle-fluid flow in hydrocyclones with different body dimensions. *Minerals Engineering*, 19 (2006) 1002-1033

WANG, B.; XU, D.L.; CHU, K.W.; YU, A.B.; Numerical study of gas-solid flow in a cyclone separator. *Applied Mathematical Modelling* 30 (2006) 1326-1342.

## Apêndice A Teste de Malhas

Para comparação entre as malhas foi feita uma simulação com o modelo de turbulência  $k-\varepsilon$  RNG (de menor custo computacional que os modelos RSM e LES) e em regime transiente para a vazão de  $6,2\text{m}^3/\text{h}$ , conforme foi citado no Capítulo 5 de resultados.

As soluções com as diferentes malhas foram comparadas sobre as mesmas linhas onde foram feitos os levantamentos experimentais de Marins (2007). A posição dos perfis medidos sobre o hidrociclone é apresentada na Figura 5.1 no Capítulo 5.

As simulações foram monitoradas pela pressão média nas faces de entrada, rejeito e saída de fundo. Além disso, a velocidade era monitorada a cada passo de tempo em alguns pontos onde se observava uma evolução no escoamento.

Simulou-se o escoamento em regime transiente, tendo-se confirmado o dado de literatura (Cortés e Gil, 2007, por exemplo) de que o escoamento atinge um estado quase estacionário, onde a solução estabiliza com o tempo (mantendo perfis quase constantes com o tempo) restando apenas algumas flutuações sutis conforme é mostrado na Fig. A.1.

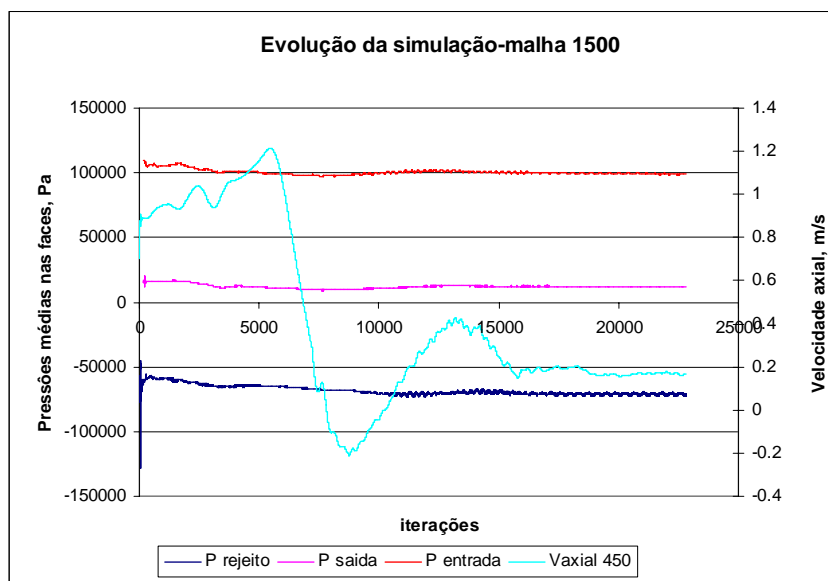


Figura A.1: Parâmetros monitorados ao longo da convergência para a malha 1500

Observa-se ainda, que as pressões médias nas faces atingem seu estado quase estacionário (tendem a um valor) antes do campo de velocidades. Ou seja, a convergência das pressões ocorre antes das velocidades ao longo do modelo estarem totalmente desenvolvidas. Acompanhamentos semelhantes foram feitos para as demais malhas 500, 1000 e 1500b, até a obtenção do mesmo regime.

Inicialmente foram comparadas as diferenças de pressão estática média sobre as entradas (ent+ e ent-) e as saídas ('overflow' e 'underflow'). O comparativo entre as diferentes malhas é apresentado na Tabela A.1.

Tabela A.1: Pressões estáticas médias, diferencial de pressão (E-O entrada – rejeito e E-U entrada – saída de fundo) e razão de pressões (E-O/E-U), nas faces com as diferentes malhas.

Malhas	Superfícies				E-O bar	E-U bar	Razão de Pressões
	ent+	ent-	overflow	underflow			
500	92864	92894	-69016	10992	1.619	0.819	1.98
1000	98793	98788	-70536	12646	1.693	0.861	1.97
1500	98705	98739	-71376	12146	1.701	0.866	1.96
1500b	95958	95958	-70055	12297	1.660	0.837	1.98

Com base nas pressões não se observa diferença sensível com o adensamento da malha, embora se perceba que os resultados das malhas 1000, 1500 e 1500b são mais próximos entre si.

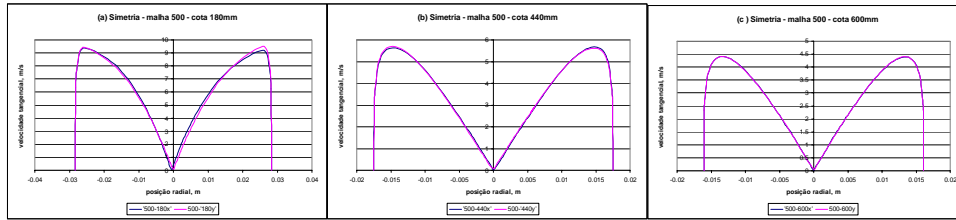
Contudo, por se tratar de um parâmetro médio da face, a comparação não foi feita apenas com base na pressão estática, foram também usados os perfis de velocidade tangencial e axial.

Em cada altura indicada na figura 5.1 foram levantados, na simulação, dois perfis radiais ortogonais indicados pelas letras x e y. A seguir são mostrados os resultados na forma de gráficos comparando primeiramente a simetria do escoamento, ou seja, a apresentação dos perfis ortogonais de velocidades tangenciais e axiais nas Figs. A.2 e A.3, respectivamente. Após, é mostrada a comparação dos perfis de velocidade com o adensamento da malha, sendo na Fig. A.4 os perfis tangenciais e na Fig. A.5 os perfis axiais.

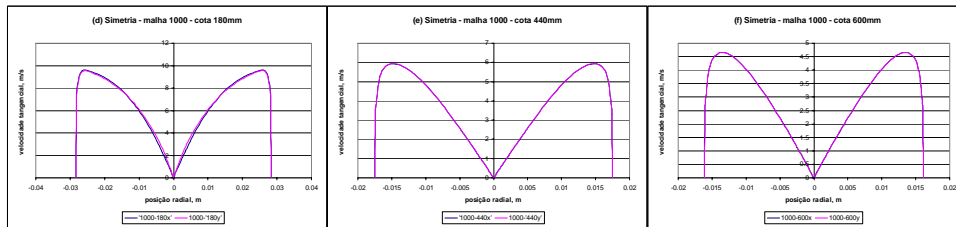
Analisando-se a Fig. A.2 é vista a grande simetria nos perfis radiais de velocidade tangencial. A diferença entre os valores foi de até cerca de 0,3 m/s. Estes resultados são coerentes com a teoria de turbulência isotrópica do modelo a duas equações. Na Fig. A.3 percebe-se uma pequena variação, principalmente pela menor escala dos eixos das abscissas, mas a diferença entre os valores ficou



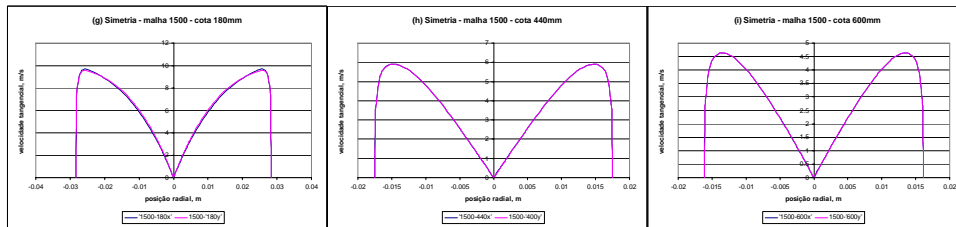
igualmente na ordem de 0,3 m/s.



(a) Malha 500 - 180 mm (b) Malha 500 - 440 mm (c) Malha 500 - 600 mm

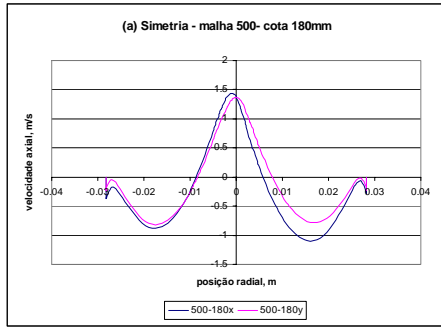


(d) Malha 1000 - 180 mm (e) Malha 1000 - 440 mm (f) Malha 1000 - 600 mm

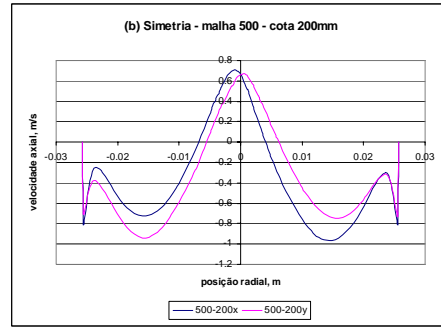


(g) Malha 1500 - 180 mm (h) Malha 1500 - 440 mm (i) Malha 1500 - 600 mm

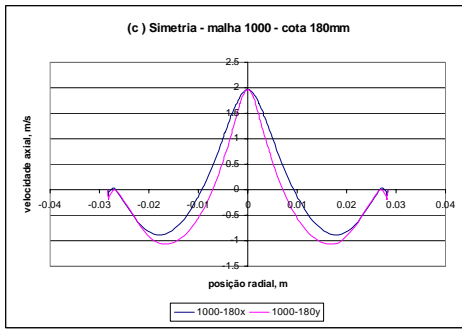
Figura A.2: Perfis ortogonais de velocidades tangenciais: (a) malha 500 sobre a cota 180mm, (b) malha 500 sobre a cota 440mm, (c) malha 500 sobre a cota 600mm, (d) malha 1000 sobre a cota 180mm, (e) malha 1000 sobre a cota 440mm, (f) malha 1000 sobre a cota 600mm, (g) malha 1500 sobre a cota 180mm, (h) malha 1500 sobre a cota 440mm, (i) malha 1500 sobre a cota 600mm,



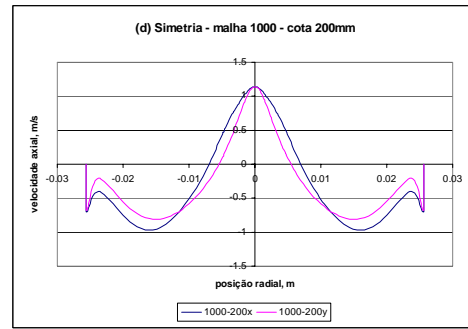
(a) Malha 500 - 180 mm



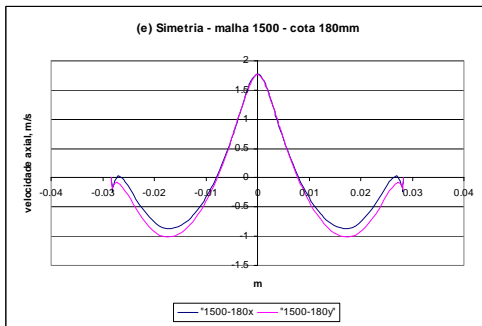
(b) Malha 500 - 200 mm



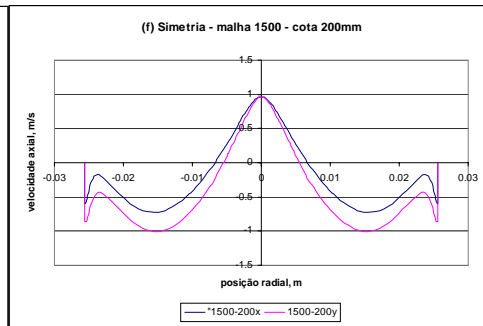
(c) Malha 1000 - 180 mm



(d) Malha 1000 - 200 mm



(e) Malha 1500 - 180 mm



(f) Malha 1500 - 200 mm

Figura A.3: Perfis ortogonais de velocidades axiais

Percebe-se nos gráficos da Fig. A.4 que entre todas as malhas existe uma grande simetria radial na velocidade tangencial, porém é perceptível que a malha 500 difere levemente dos resultados com as malhas 1.000, 1.500 e 1500b em todas as posições. Os resultados da malha 1.000, 1.500 e 1500b por outro lado se sobrepõem em todos os gráficos.

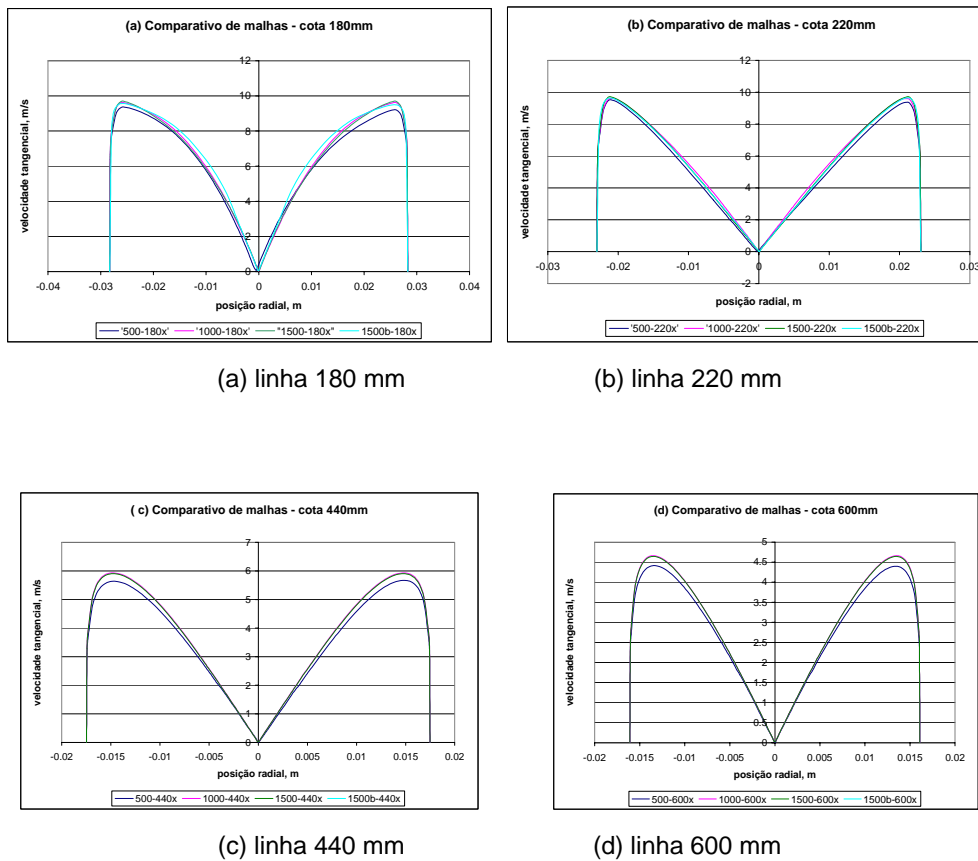


Figura A.4: Perfis tangenciais, comparativo entre malhas

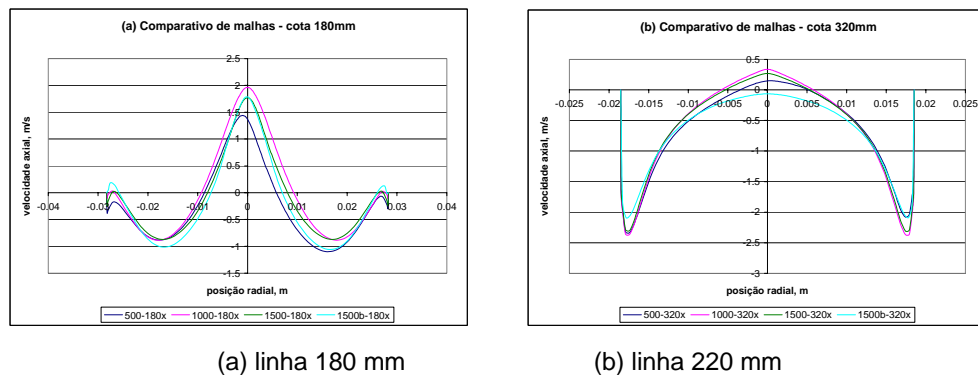


Figura A.5: Perfis axiais, comparativo entre malhas

Analisando os gráficos da Fig. A.5, de velocidades axiais em função da malha, percebemos que não há uma sobreposição perfeita. Porém, isso ocorre novamente pela menor escala do eixo abscissas, pois as diferenças entre as malhas encontram-se na mesma faixa de diferença entre as linhas ortogonais de um mesmo modelo, inferiores a 0,3 m/s.

De qualquer forma, sabe-se da literatura que o campo centrífugo, relacionado ao perfil de velocidade tangencial é o principal parâmetro a ser modelado, pois os demais, como os perfis de velocidade axial e de pressão, podem ser tratados como função do campo centrífugo.

Desta maneira foi selecionada a malha 1.000 para continuar o trabalho, assim economizando recurso computacional.

Foi considerado que a mudança de modelo de turbulência para o RSM não deve afetar grandemente a adequação da malha selecionada uma vez que os gradientes envolvidos são da mesma ordem de grandeza.