



Bruno Venturini Loureiro

**Escoamento secundário em um anular parcialmente
obstruído com rotação do cilindro interno**

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientadores: Paulo Roberto de Souza Mendes
Luis Fernando Alzuguir Azevedo

Rio de Janeiro, 15 de dezembro de 2004.



Bruno Venturini Loureiro

Escoamento secundário em um anular parcialmente obstruído com rotação do cilindro interno

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Paulo Roberto de Souza Mendes
Orientador, PUC-RIO

Luis Fernando Alzuguir Azevedo
Orientador, PUC-RIO

Marcos Sebastião de Paula Gomes
PUC-RIO

Mônica Feijó Naccache
PUC-RIO

André Leibsohn Martins
CENPES/PETROBRAS

Átila Pantaleão Silva Freire
COPPE/UFRJ

Sidney Stuckenbruck
Olympus Software Científico e Engenharia

José Eugenio Leal
Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 15 de dezembro de 2004.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Bruno Venturini Loureiro

Graduou-se em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) em 1998, onde também obteve o título de Mestre em Engenharia Mecânica em 2001. Professor universitário desde 2000 na Faculdade Centro Leste – UCL.

Ficha Catalográfica

Loureiro, Bruno Venturini

Caracterização de escoamento secundário em um anular parcialmente obstruído com rotação do cilindro interno / Bruno Venturini Loureiro; orientador: Paulo Roberto de Souza Mendes, Luis Fernando Alzuguir Azevedo. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, 2004.

181 f. : il.; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Escoamento secundário. 3. Vórtices de Taylor. 4. Espaço anular parcialmente obstruído. 5. Taylor-Couette. I. Mendes, Paulo Roberto de Souza. II. Azevedo, Luis Fernando Alzuguir. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

Para minha querida mulher, Ana Carla, pela dedicação e amor,
minha mãe, Valentina, pelo carinho e apoio materno,
meus irmãos, Hugo e Diego pela amizade, e
ao meu sogro, Evaldo, e minha sogra, Zilda, pela compreensão.

Agradecimentos

Aos meus orientadores, Paulo Roberto de Souza Mendes e Luis Fernando Alzuguir Azevedo, pela confiança a mim prestada em todos os momentos e pela amizade construída.

Aos diretores da Faculdade Centro Leste - UCL, Carlos Alberto de Oliveira, Maria Ângela Loyola de Oliveira, Maurício Del Caro, Sandro Lobato e Cleverson José Fontana (in memoriam) pelo total apoio concedido durante o período de doutoramento, sem o qual este trabalho dificilmente teria sido concluído.

À minha querida mulher que me apoiou nessa etapa da vida com seu amor, fidelidade e determinação, assim como aos meus pais pela educação a mim concedida.

Aos meus amigos da UFES, Aristóteles Alves Lyrio e Rogério Silveira de Queiroz, pelo incentivo para fazer o doutorado.

Aos amigos da Igreja Batista Central de Olaria e a família da Sr^a. Nerília Gaetano de Freitas que fizeram meus dias na corte do Rio de Janeiro mais alegres.

Ao CNPq, à FAPERJ, à Faculdade Centro Leste – UCL e à PUC-RIO pelos auxílios concedidos.

Ao Sr. Jandir pela construção do meu experimento com todo zelo e dedicação.

Aos meus amigos do mestrado Julio Manoel Barros Jr. e Eduardo S. S. Dutra e ao meu amigo de doutorado Reginaldo Rosa Cotto pela amizade e ajuda em todos os momentos. Assim como aos meus colegas de trabalho do Laboratório de termociências: Andréa, Daniel, Deivid, Diogo, Fábio, Juliana, Maurício e Pedro que contribuíram para o andamento da parte experimental desse trabalho.

Ao professor Lauro Venturini, meu tio, aposentado do curso de Letras da UFES, pela revisão do texto e aos professores que participaram da banca examinadora.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-RIO pelo convívio saudável e pelo apoio administrativo.

Resumo

Loureiro, Bruno Venturini. **Escoamento secundário em um anular parcialmente obstruído com rotação do cilindro interno.** Rio de Janeiro, 2004. 181p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O escoamento em um espaço anular parcialmente obstruído é estudado para uma geometria entre cilindros concêntricos. A obstrução parcial é uma primeira aproximação de um escoamento em um espaço anular com um leito de cascalhos sedimentado que ocorre no processo de perfuração de poços para produção de óleo e gás, particularmente no caso de poços inclinados e horizontais. A presença de uma placa de obstrução parcial promove a assimetria no escoamento de tal modo que interfere na formação do regime de vórtices de Taylor. O campo de velocidade para esses escoamentos foi obtido via solução numérica e experimental. Nas simulações numéricas, as equações de conservação de massa e quantidade de movimento linear foram resolvidas para um escoamento de fluido newtoniano e não newtoniano pela técnica de volumes finitos. Os resultados experimentais foram obtidos a partir de campos instantâneos e médios de velocidade em planos meridionais do espaço anular usando a técnica de velocimetria por imagens de partículas (PIV). As medições focalizaram a obtenção do número de Reynolds rotacional crítico e a obtenção do perfil de velocidade axial passando pelo olho do vórtice. Os resultados mostram que o número de Reynolds crítico é diretamente afetado pelo grau de obstrução do espaço anular, assim como a largura dos vórtices de Taylor. O resultado dos perfis de velocidade axial calculados concorda bem com os resultados obtidos experimentalmente. A transição para o regime de vórtices de Taylor também é bem prevista pelo método numérico. Os resultados numéricos para a largura dos vórtices de Taylor não apresentam boa concordância, dependendo das condições de contorno estipuladas. A presença da placa de obstrução parcial promove uma recirculação circunferencial no escoamento que interage com o escoamento de vórtices de Taylor formando um escoamento complexo a partir de níveis de obstrução moderados.

Palavras-chave

Escoamento secundário, vórtices de Taylor, Espaço anular, Taylor-Couette.

Abstract

Loureiro, Bruno Venturini. **Secondary flow in partially-obstructed annular space with inner cylinder rotation.** Rio de Janeiro, 2004. 181p. PhD Dissertation - Department of Mechanical Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The flow inside a horizontal annulus due to the inner cylinder rotation is studied. The bottom of the annular space is partially blocked by a plate parallel to the axis of rotation, thereby destroying the circumferential symmetry of the annular space geometry. This flow configuration is found in the drilling process of horizontal petroleum wells, where a bed of cuttings is deposited at the bottom part of the annulus. The velocity field for this flow was obtained both numerically and experimentally. In the numerical work, the equations which govern the three-dimensional, laminar flow of Newtonian and non-Newtonian liquids were solved via a finite-volume technique. In the experimental research, the instantaneous and time-averaged flow fields over two-dimensional meridional sections of the annular space were measured employing the particle image velocimetry (PIV) technique, both for Newtonian and power-law liquids. Attention was focused on the determination of the onset of secondary flow in the form of distorted Taylor vortices. The results showed that the critical rotational Reynolds number is directly influenced by the degree of obstruction of the flow. The influence of the obstruction is more perceptible in Newtonian than non-Newtonian liquids. The larger is the obstruction, the larger is the critical Taylor number. The height of the obstruction also controls the width of the vortices. The calculated steady state axial velocity profiles agreed well with the corresponding measurements. Transition values of the rotational Reynolds number are also well predicted by the computations. However, the measured and predicted values for the vortex size do not agree as well. Transverse flow maps revealed a complex interaction between the Taylor vortices and the zones of recirculating flow, for moderate to high degrees of flow obstruction.

Keywords

Secondary flow, Taylor vortex, Taylor-Couette, partially-obstructed annular space.

Sumário

1 Introdução	24
1.1. Motivação	24
1.2. Revisão da literatura	27
1.3. Considerações finais	40
2 Modelo matemático	41
2.1. Descrição da configuração estudada	41
2.2. Equações	42
2.3. Equação constitutiva	44
2.4. Condições de contorno	45
2.4.1. Condição tipo A	45
2.4.2. Condição tipo B	47
2.4.3. Condição tipo C	49
2.5. Parâmetros adimensionais	50
2.6. Modelagem computacional	52
2.6.1. Método numérico	52
2.6.2. Malha de discretização	54
3 Metodologia Experimental	56
3.1. Montagem experimental	56
3.1.1. Montagem do cilindro interno	59
3.1.2. Tampas laterais e mancais	61
3.1.3. Placa de obstrução	63
3.1.4. Caixa de visualização	64
3.1.5. Enchimento da seção de teste	67
3.1.6. Transmissão de potência para o cilindro interno	68
3.1.7. Medidor de frequência angular	69
3.2. Medição de velocidade: Velocimetria por imagens de partículas	71
3.2.1. Partículas traçadoras	72
3.2.2. PIV: detalhes operacionais	73
3.2.3. Posicionamento da câmera CCD	76
3.2.4. Sincronismo do PIV com a rotação do cilindro interno	76

3.3. Medição de velocidade: velocimetria a laser Doppler	76
3.4. Medição de temperatura	77
3.5. Fluidos	78
3.5.1. Fluido newtoniano	78
3.5.2. Fluidos não newtonianos	80
3.6. Procedimento experimental	83
3.6.1. Obtenção do número de Reynolds crítico – vórtices de Taylor	84
3.6.2. Obtenção do campo de velocidade em regime permanente	84
3.7. Análise de incertezas	85
3.7.1. Incerteza expandida para o número de Reynolds crítico	87
4 Resultados	89
4.1. Considerações iniciais	89
4.2. Qualificação dos experimentos e soluções numéricas para um anular livre de obstrução parcial	90
4.3. Efeito da aceleração angular sobre a transição do escoamento	91
4.4. Número de Reynolds Crítico	95
4.5. Características geométricas dos vórtices	103
4.6. Campos de velocidade no plano $r-z$	106
4.6.1. Sem obstrução parcial do espaço anular	106
4.6.2. Com obstrução parcial do espaço anular	108
4.7. Perfis de velocidade axial	110
4.7.1. Fluido newtoniano	110
4.7.2. Fluido não newtoniano	117
4.8. Campos de velocidade no plano $r-\theta$	122
4.9. Campo de taxa de deformação e viscosidade	140
4.10. Coeficiente de atrito médio sobre a placa de obstrução	147
4.11. Tensão cisalhante sobre a placa	150
5 Conclusões e recomendações para trabalhos futuros	154
5.1. Conclusões	154
5.2. Recomendações para trabalhos futuros	157
Referências bibliográficas	160
Apêndices	165

Lista de figuras

Figura 1 – Representação ilustrativa de um processo de perfuração	25
Figura 2 – Figura esquemática da configuração simplificada do problema real.	27
Figura 3 – Regimes observados em um escoamento entre cilindros concêntricos com rotações independentes e razão de raios igual a 0,883. Andereck et al. (1986).	29
Figura 4 – Representação esquemática das estruturas toroidais dos vórtices de Taylor.	31
Figura 5 - Valores críticos de Reynolds rotacional em função da razão de raios. DiPrima et al. (1984).	33
Figura 6 - Regimes de escoamento para uma geometria anular com rotação do cilindro interno e escoamento axial. Lueptow et al. (1992).	38
Figura 7 - Seção transversal do anular estudado. (a) Espaço anular livre; (b) Espaço anular parcialmente obstruído.	41
Figura 8 - Geometria estudada e sistema de coordenadas cilíndricas.	42
Figura 9 - Geometria do tipo A: simetria na metade axial do anular e domínio estendido na extremidade.	46
Figura 10 – Representação esquemática dos ângulos α e φ para determinação da condição de contorno sobre a placa horizontal.	47
Figura 11 - Geometria do tipo B: simetria na metade axial do anular e condição de não deslizamento na parede da extremidade.	48
Figura 12 - Geometria do tipo C: condição de não deslizamento nas duas paredes da extremidade.	49
Figura 13 – Geometria utilizada na discretização do problema e o número de nós nos eixos principais.	55
Figura 14 - Desenho esquemático da montagem experimental.	58
Figura 15 – Representação esquemática da montagem do cilindro interno. (a) Montagem geral; (b) montagem da camisa com dois anéis de vedação entre dois cilindros.	59
Figura 16 – Montagem final. (a) Entre tubos; (b) Entre a ponta de eixo e cilindro de alumínio.	60
Figura 17 – Vista da montagem do mancal na tampa lateral de acrílico.	61
Figura 18 – Rebaixo na tampa lateral para impedir a presença de escoamento entre a tampa lateral e o cilindro interno.	62

Figura 19 – Montagem real do mancal na tampa lateral.	62
Figura 20 – Placa horizontal de acrílico. Detalhes construtivos.	63
Figura 21 – Representação esquemática da montagem da camisa com dois anéis de vedação entre dois cilindros. Montagem do cilindro interno.	65
Figura 22 – Caixa de acrílico. (a) Representação esquemática do dispositivo de fixação da caixa de visualização no cilindro de acrílico. (b) Foto do suporte inferior da caixa.	66
Figura 23 – Sistema de transmissão montado na ponta do eixo em uma das extremidades do cilindro.	69
Figura 24 – Foto do encoder e da chave óptica montada na ponta do eixo do cilindro interno.	70
Figura 25- Foto da bancada experimental com o laser do sistema de PIV em funcionamento.	72
Figura 26 - Foto ilustrativa de uma solução coloidal com esferas do tipo CONDUCT-O-FIL® obtida por microscópio eletrônico de varredura.	73
Figura 27 - Imagem com alta densidade de partículas. (a) imagem nº 1, t: 0,0s; (b) imagem nº 2, t: 400,0ms.	74
Figura 28 - Campo de velocidade para o par de imagens da Figura 3.6. Área de interrogação com 64×64 pixels, usando a geração de malha pelo método de Nyquist.	75
Figura 29 – Viscosidade da solução de água e glicerina. Concentração expressa em percentual de peso. Temperatura de 25°C.	79
Figura 30 - Gráfico da viscosidade em função da taxa de cisalhamento para fluidos com diferentes soluções de glicerina com solução neutralizada de carbopol 0,15%. □ 25% Glicerina e 75% Carbopol 0,15%; + 25% Glicerina e 75% Carbopol 0,15% modificado; × 50% Glicerina e 50% Carbopol 0,15%; e ○ 50% Glicerina e 50% Carbopol 0,15% modificado; Δ Exemplo de lama de perfuração utilizada pela PETROBRAS S.A.	82
Figura 31 – Representação esquemática das incertezas consideradas no número de Reynolds crítico. Gráfico espinha de peixe das incertezas.	87
Figura 32 - Perfil de velocidade tangencial adimensional ao longo da coordenada radial adimensionalizada. $\xi \leq r_1^* \leq 1$	91
Figura 33 – Rampa de rotação realizada para diversas acelerações angulares do cilindro interno. Acelerações adimensionais, a^* , obtidas pelas rampas: (A) 914.2; (B) 470.8; (C) 187.2; (D) 96.2; (E) 48.2; (F) 22.9; (G) 16.6; (H) 10.8.	93

Figura 34 - Influência da aceleração adimensional sobre o número de Reynolds crítico.	94
Figura 35 - Razão da velocidade axial com a velocidade tangencial em função do número de Reynolds crítico para um anular com $\frac{1}{4}$ do espaço obstruído.	97
Figura 36 - Obtenção do número de Reynolds crítico para um anular com $\frac{1}{4}$ do espaço obstruído utilizando a técnica da derivada da razão das somatórias de velocidade.	97
Figura 37 - Razão da velocidade axial com a velocidade tangencial em função do número de Reynolds crítico para um anular com $\chi = 0$ e fluido não newtoniano.	98
Figura 38 - Obtenção do número de Reynolds crítico para um anular com $\chi = 0$ e fluido não newtoniano, utilizando a técnica da derivada da razão das somatórias de velocidade.	98
Figura 39 - Número de Reynolds crítico para diversas obstruções e diferentes fluidos.	99
Figura 40 - Normalização do número de Reynolds crítico para diversas obstruções e diferentes fluidos.	101
Figura 41 - Diferença entre a transição adimensional para diversas obstruções e diferentes fluidos em relação a transição para fluido newtoniano.	102
Figura 42 - Variação da largura adimensional dos vórtices de Taylor com o parâmetro adimensional χ . Fluido newtoniano.	104
Figura 43 - Obtenção da largura do vórtice de Taylor a partir do campo de velocidade dos resultados experimentais e da solução numérica.	105
Figura 44 - Campo de velocidade em r-z: estrutura do vórtice de Taylor obtido por solução numérica.	106
Figura 45 - Solução numérica para o campo de velocidade tangencial para o plano r-z de um anular livre de obstrução. Velocidades dadas em m/s. (a) Sem vórtices de Taylor, $Re = 31,1$; (b) Com vórtices de Taylor, $Re = 83,0$. $Re_{c-Num.} = 69,5$. Fluido newtoniano.	107
Figura 46 - Campo de velocidade obtido numericamente no plano r-z para a geometria de $\chi = 0,75$.	109
Figura 47 - Linha de Trajetória de uma partícula ilustrando as recirculações existentes dentro da estrutura do vórtice de Taylor.	109
Figura 48 - Perfil de velocidade axial para o regime Taylor-Couette em um espaço anular livre de obstrução. $Re: 85,2; Re \approx 1,2Re_c. \xi \leq r_1^* \leq 1$.	112

- Figura 49 – Perfil de velocidade axial para o regime Taylor-Couette em um espaço anular livre de obstrução. $Re: 103,5; Re \approx 1,5Re_c. \xi \leq r_1^* \leq 1.$ 112
- Figura 50. Perfil de velocidade axial para o regime Taylor-Couette em um espaço anular livre de obstrução. $Re: 126,1; Re \approx 1,8Re_c. \xi \leq r_1^* \leq 1.$ 113
- Figura 51. Perfis de velocidade para o regime Taylor-Couette para os planos meridionais 0 e 180° . $Re: 108; Re \approx 1,2Re_c. \chi = 0,500. \xi \leq r_1^* \leq 1.$ 114
- Figura 52. Perfis de velocidade para o regime Taylor-Couette para o plano meridional de 90° , $Re: 108; Re \approx 1,2Re_c. \chi = 0,500. \xi \leq r_1^* \leq 1.$ 114
- Figura 53. Perfis de velocidade para o regime Taylor-Couette para o plano meridional de 270° , $Re: 108; Re \approx 1,2Re_c. \chi = 0,500. \xi \leq r_1^* \leq 1.$ 115
- Figura 54 – Perfis de velocidade para o regime Taylor-Couette para o plano meridional. $Re: 219,4; Re \approx 1,5Re_c. \chi = 0,750. \xi \leq r_1^* \leq 1.$ 116
- Figura 55 – Perfis de velocidade para o regime Taylor-Couette para o plano meridional de 90° , $Re: 219,4; Re \approx 1,5Re_c. \chi = 0,750. \xi \leq r_1^* \leq 1.$ 116
- Figura 56 - Perfis de velocidade para o regime Taylor-Couette para o plano meridional de 270° , $Re: 219,4; Re \approx 1,5Re_c. \chi = 0,750. \xi \leq r_1^* \leq 1.$ 117
- Figura 57 – Perfis de velocidade para o regime Taylor-Couette para o plano meridional, $Re: 98,4; Re \approx 1,5Re_c. \chi = 0. \xi \leq r_1^* \leq 1.$ Fluido não newtoniano ($n = 0,406$). 118
- Figura 58 – Perfis de velocidade para o regime Taylor-Couette para o plano meridional, $Re: 118,1; Re \approx 1,8Re_c. \chi = 0. \xi \leq r_1^* \leq 1.$ Fluido não newtoniano ($n = 0,406$). 118
- Figura 59 – Perfis de velocidade para o regime Taylor-Couette para os planos meridionais $\theta = 0^\circ$ e 180° , $Re: 69,5; Re \approx 1,03Re_c. \chi = 0,250. \xi \leq r_1^* \leq 1.$ Fluido não newtoniano ($n = 0,704$). 120
- Figura 60 – Perfis de velocidade para o regime Taylor-Couette para os planos meridionais $\theta = 90^\circ$ e 270° , $Re: 69,5; Re \approx 1,03Re_c. \chi = 0,250. \xi \leq r_1^* \leq 1.$ Fluido não newtoniano ($n = 0,704$). 120
- Figura 61 – Perfis de velocidade para o regime Taylor-Couette para os planos meridionais $\theta = 0^\circ$ e 180° , $Re: 80,0; Re \approx 1,03Re_c. \chi = 0,500. \xi \leq r_1^* \leq 1.$ Fluido não newtoniano ($n = 0,704$). 121
- Figura 62 – Perfis de velocidade para o regime Taylor-Couette para os planos

meridionais $\theta = 90^\circ$ e 270° , $Re: 80,0$; $Re \approx 1,03Re_c$. $\chi = 0,500$. $\xi \leq r_1^* \leq 1$.

Fluido não newtoniano ($n = 0,704$). 121

Figura 63 - Linhas de corrente para a seção transversal de uma geometria com $\chi = 0,75$ sem a presença de vórtices de Taylor. 122

Figura 64 - Campo de velocidade transversal para a metade inferior do espaço anular. (a) entre dois vórtices com o campo de velocidade radial entrando; (b) passando pelo olho do vórtice; (c) entre dois vórtices com o campo de velocidade radial saindo; $Re: 149$, $\chi = 0,75$; sentido de giro do cilindro interno: anti-horário. 123

Figura 65 – Campo de velocidade a montante da placa para um plano entre dois vórtices com o campo de velocidade radial entrando. $Re: 149$, $\chi = 0,75$; sentido de giro do cilindro interno: anti-horário. 125

Figura 66 - Campo de velocidade a montante da placa para um plano entre dois vórtices com o campo de velocidade radial entrando. $Re: 149$, $\chi = 0,75$; sentido de giro do cilindro interno: anti-horário. 126

Figura 67 - Campo de velocidade a jusante da placa para um plano entre dois vórtices com o campo de velocidade radial entrando. $Re: 149$, $\chi = 0,75$; sentido de giro do cilindro interno: anti-horário. 126

Figura 68 - Campo de velocidade a jusante da placa para um plano entre dois vórtices com o campo de velocidade radial entrando. $Re: 149$, $\chi = 0,75$; sentido de giro do cilindro interno: anti-horário. 127

Figura 69 – Campo de velocidade transversal para a metade inferior do espaço anular. (a) entre dois vórtices com o campo de velocidade radial entrando; (b) passando pelo olho do vórtice; (c) entre dois vórtices com o campo de velocidade radial saindo; $Re: 105,4$, $\chi = 0,625$; sentido de giro do cilindro interno: anti-horário. 128

Figura 70 – Campo de velocidade a montante da placa para um plano entre dois vórtices com o campo de velocidade radial entrando. $Re: 105,4$, $\chi = 0,625$; sentido de giro do cilindro interno: anti-horário. 129

Figura 71 – Campo de velocidade a montante da placa para um plano entre dois vórtices com o campo de velocidade radial saindo. $Re: 105,4$, $\chi = 0,625$; sentido de giro do cilindro interno: anti-horário. 129

Figura 72 – Campo de velocidade a jusante da placa para um plano entre dois vórtices com o campo de velocidade radial entrando. $Re: 105,4$, $\chi = 0,625$; sentido de giro do cilindro interno: anti-horário. 130

- Figura 73 – Campo de velocidade a jusante da placa para um plano entre dois vórtices com o campo de velocidade radial saindo. Re: 105,4, $\chi = 0,625$; sentido de giro do cilindro interno: anti-horário. 130
- Figura 74 – Campo de velocidade transversal para a metade inferior do espaço anular. (a) entre dois vórtices com o campo de velocidade radial entrando; (b) passando pelo olho do vórtice; (c) entre dois vórtices com o campo de velocidade radial saindo; Re: 90,3, $\chi = 0,500$; sentido de giro do cilindro interno: anti-horário. 131
- Figura 75 – Campo de velocidade a montante da placa para um plano entre dois vórtices com o campo de velocidade saindo radialmente. Re: 90,3, $\chi = 0,500$; sentido de giro do cilindro interno: anti-horário. 132
- Figura 76 – Campo de velocidade a montante da placa para um plano entre dois vórtices com o campo de velocidade entrando radialmente. Re: 90,3, $\chi = 0,500$; sentido de giro do cilindro interno: anti-horário. 133
- Figura 77 – Campo de velocidade a jusante da placa para um plano entre dois vórtices com o campo de velocidade saindo radialmente. Re: 90,3, $\chi = 0,500$; sentido de giro do cilindro interno: anti-horário. 133
- Figura 78 – Campo de velocidade a jusante da placa para um plano entre dois vórtices com o campo de velocidade entrando radialmente. Re: 90,3, $\chi = 0,500$; sentido de giro do cilindro interno: anti-horário. 134
- Figura 79 – Campo de velocidade a jusante da placa para um plano passando pelo olho do vórtice. Re: 90,3, $\chi = 0,500$; sentido de giro do cilindro interno: anti-horário. 134
- Figura 80 - Campo de velocidade transversal para metade do espaço anular para um fluido não newtoniano ($n = 0,704$): identificação do ponto de recolamento. (a) Entre dois vórtices com o campo de velocidade radial entrando; (b) Entre dois vórtices com o campo de velocidade radial saindo; Re: 91,2, $\chi = 0,625$; sentido de giro do cilindro interno: anti-horário. 135
- Figura 81 – Campo de velocidade a montante da placa para um plano entre dois vórtices com o campo de velocidade entrando radialmente para um fluido não newtoniano ($n = 0,704$). Re: 91,2, $\chi = 0,625$; sentido de giro do cilindro interno: anti-horário. 136
- Figura 82 – Campo de velocidade a montante da placa para um plano entre dois vórtices com o campo de velocidade saindo radialmente para um fluido não newtoniano ($n = 0,704$). Re: 91,2, $\chi = 0,625$; sentido de giro do cilindro interno: anti-horário. 137

- Figura 83 – Campo de velocidade a jusante da placa para um plano entre dois vórtices com o campo de velocidade entrando radialmente para um fluido não newtoniano ($n = 0,704$). $Re = 78,5$, $\chi = 0,500$; sentido de giro do cilindro interno: anti-horário. 138
- Figura 84 – Campo de velocidade a jusante da placa para um plano entre dois vórtices com o campo de velocidade saindo radialmente para um fluido não newtoniano ($n = 0,704$). $Re = 78,5$, $\chi = 0,500$; sentido de giro do cilindro interno: anti-horário. 138
- Figura 85 – Campo de velocidade a montante da placa para um plano entre dois vórtices com o campo de velocidade entrando radialmente para um fluido não newtoniano ($n = 0,704$). $Re = 78,5$, $\chi = 0,500$; sentido de giro do cilindro interno: anti-horário. 139
- Figura 86 – Campo de velocidade a montante da placa para um plano entre dois vórtices com o campo de velocidade saindo radialmente para um fluido não newtoniano ($n = 0,704$). $Re = 78,5$, $\chi = 0,500$; sentido de giro do cilindro interno: anti-horário. 139
- Figura 87 – Campo de taxa de deformação, $[\dot{\gamma}] = [s^{-1}]$, para escoamento de um fluido não newtoniano ($n = 0,704$) no plano r-z para $\theta = 0-180^\circ$. $Re = 76,4$. $Re_c = 77,6$. $\chi = 0,500$. 141
- Figura 88 – Campo de taxa de deformação, $[\dot{\gamma}] = [s^{-1}]$, para escoamento de um fluido não newtoniano ($n = 0,704$) no plano r-z para $\theta = 0-180^\circ$. $Re = 77,7$. $Re_c = 77,6$. $\chi = 0,500$. 141
- Figura 89 – Campo de taxa de deformação, $[\dot{\gamma}] = [s^{-1}]$, para escoamento de um fluido não newtoniano ($n = 0,704$) no plano r-z para $\theta = 0-180^\circ$. $Re = 78,5$. $Re_c = 77,6$. $\chi = 0,500$. 142
- Figura 90 – Campo de viscosidade, $[\eta] = [Pa.s]$, para escoamento de um fluido não newtoniano ($n = 0,704$) no plano r-z para $\theta = 0-180^\circ$. $Re = 76,4$. $Re_c = 77,6$. $\chi = 0,500$. 142
- Figura 91 – Campo de viscosidade, $[\eta] = [Pa.s]$, para escoamento de um fluido não newtoniano ($n = 0,704$) no plano r-z para $\theta = 0-180^\circ$. $Re = 77,7$. $Re_c = 77,6$. $\chi = 0,500$. 143
- Figura 92 – Campo de viscosidade, $[\eta] = [Pa.s]$, para escoamento de um fluido não newtoniano ($n = 0,704$) no plano r-z para $\theta = 0-180^\circ$. $Re = 78,5$. $Re_c = 77,6$. $\chi = 0,500$. 143

- Figura 93 – Campo de taxa de deformação, $[\dot{\gamma}] = [s^{-1}]$, para escoamento de um fluido não newtoniano ($n = 0,704$) no plano r-z para $\theta = 0-180^\circ$. $Re = 89,6$. $Re_c = 90,4$. $\chi = 0,625$. 144
- Figura 94 – Campo de taxa de deformação, $[\dot{\gamma}] = [s^{-1}]$, para escoamento de um fluido não newtoniano ($n = 0,704$) no plano r-z para $\theta = 0-180^\circ$. $Re = 90,5$. $Re_c = 90,4$. $\chi = 0,625$. 145
- Figura 95 – Campo de taxa de deformação, $[\dot{\gamma}] = [s^{-1}]$, para escoamento de um fluido não newtoniano ($n = 0,704$) no plano r-z para $\theta = 0-180^\circ$. $Re = 91,2$. $Re_c = 90,4$. $\chi = 0,625$. 145
- Figura 96 – Campo de viscosidade, $[\eta] = [Pa.s]$, para escoamento de um fluido não newtoniano ($n = 0,704$) no plano r-z para $\theta = 0-180^\circ$. $Re = 89,6$. $Re_c = 90,4$. $\chi = 0,625$. 146
- Figura 97 – Campo de viscosidade, $[\eta] = [Pa.s]$, para escoamento de um fluido não newtoniano ($n = 0,704$) no plano r-z para $\theta = 0-180^\circ$. $Re = 90,5$. $Re_c = 90,4$. $\chi = 0,625$. 146
- Figura 98 – Campo de viscosidade, $[\eta] = [Pa.s]$, para escoamento de um fluido não newtoniano ($n = 0,704$) no plano r-z para $\theta = 0-180^\circ$. $Re = 91,2$. $Re_c = 90,4$. $\chi = 0,625$. 147
- Figura 99 – Componentes das tensões cisalhantes atuantes sobre a placa de obstrução parcial em coordenadas cartesianas. 148
- Figura 100 – Coeficiente de atrito médio normalizado, $c_f / (c_f)_{Rec}$, em função do número de Reynolds normalizado para diferentes fluidos e níveis de obstrução parcial do anular. 149
- Figura 101 – Campo de tensão cisalhante sobre a placa. (a) $Re: 87.2 [0.99 \cdot Rec]$; (b) $Re: 105.2 [1.20 \cdot Rec]$; (c) Complemento da área acumulada. $\chi = 0,500$. 152
- Figura 102 – Tensão cisalhante sobre a placa. (a) $Re: 145.3 [0.99 \cdot Rec]$; (b) $Re: 175.6 [1.20 \cdot Rec]$; (c) Complemento da área acumulada. $\chi = 0.750$. 153
- Figura 103 – Comparação entre os perfil de velocidade obtidos por diferentes malhas. Plano $\theta = 180^\circ$. $\chi = 0,250$. 165
- Figura 104 – Comparação entre os perfil de velocidade obtidos por diferentes malhas. Plano $\theta = 0^\circ$. $\chi = 0,250$. 166
- Figura 105 – Desenho esquemático do problema com a disposição dos índices de refração. 169

- Figura 106 – Desenho esquemático do posicionamento do volume de medição – cor I a partir do deslocamento da sonda. 170
- Figura 107 – Desenho esquemático do posicionamento do volume de medição – cor II. 171
- Figura 108 – Desenho esquemático do posicionamento do volume de medição – cor II a partir do deslocamento da sonda. Vista longitudinal. 172

Lista de tabelas

Tabela 1 – Viscosidade cinemática para a solução de glicerina e água destilada.	80
Tabela 2 – Parâmetros reológicos dos fluidos testados para o modelo de Ostwald.	83
Tabela 3 – Número de Reynolds crítico para as acelerações angulares dimensionais e adimensionais.	92
Tabela 4 – Resultados experimentais e numéricos do número de Reynolds crítico para vários valores de χ . Fluido newtoniano.	100
Tabela 5 – Resultados experimentais e numéricos do número de Reynolds crítico para vários valores de χ . Fluido não newtoniano ($n = 0,704$)	100
Tabela 6 – Coeficientes ajustados para a função $\Delta\Lambda$ e coeficiente de correlação ao quadrado.	103
Tabela 7 – Experimentos pertencentes a cada grupo experimental apresentado nas Figuras 48, 49 e 50.	111
Tabela 8 – Velocidade angular para o número de Reynolds crítico, de acordo com as propriedades do fluido, e coeficiente de atrito médio sobre a placa de obstrução parcial.	150
Tabela 9 – Largura dos vórtices para a geometria com obstrução parcial $\chi = 0,250$.	166

Lista de Símbolos

Símbolos Arábicos

a	Constante de ajuste de curva
a^*	Aceleração adimensional (1)
a_p, a_{nb}	Coefficientes da equação de discretização
b	Constante de ajuste de curva
b_{nb}	Contribuição da parte constante de S
c_f	Coefficiente de atrito de Fanning (1)
c_f^*	Coefficiente de atrito de Fanning normalizado (1)
d	Espaço entre os cilindros interno e externo (m)
D	Tensor taxa de deformação
f	fator de atrito (1)
f_2	Freqüência de modulação axial dos vórtices (Hz)
G	Grandeza de uma variável qualquer
h	Altura de obstrução da placa (m)
k	Índice de consistência (Pa.s ⁿ)
K	Coefficiente de expansão da incerteza
L	Comprimento axial dos tubos (m)
L_E	Comprimento axial estendido dos tubos (m)
M	Número de variáveis independentes envolvidas no cálculo da incerteza
N	número total de nós da malha
n	Índice de comportamento (1)
p	Pressão estática (Pa)
P	Pressão modificada (Pa)
P^*	Pressão adimensional (1)
r	Coordenada radial
r_i	Raio interno (m)
r_e	Raio externo (m)
r^*	Coordenada radial adimensional (1), $r^* = r/d$
r_1^*	Coordenada radial adimensional modificada(1), $r_1^* = r/r_e$
Re	Número de Reynolds rotacional (1)
Re_c	Número de Reynolds rotacional crítico (1)
R^c	Resíduo da equação de conservação de massa
R_c	Resíduo adimensionalizado

$R_{c.it}$	Resíduo da iteração
$R_{c.5}$	Maior resíduo das cinco primeiras iterações
R^ϕ	Resíduo do método numérico
R^2	Coeficiente de correlação ao quadrado
S	Termo fonte
S_c	Termo fonte constante
S_p	Termo fonte variável
t	Tempo (s)
t^*	Tempo adimensional (1)
T	Temperatura (0°C)
v_c	Velocidade característica do escoamento (m/s)
v_r	Componente de velocidade radial (m/s)
v_z	Componente de velocidade radial (m/s)
v_θ	Componente de velocidade radial (m/s)
v_r^*	Componente de velocidade radial adimensionalizada (1)
v_z^*	Componente de velocidade radial adimensionalizada (1)
v_θ^*	Componente de velocidade radial adimensionalizada (1)
z	Coordenada axial do sistema de coordenadas cilíndricas (m)

Símbolos gregos

α	Ângulo de início da obstrução (rad)
β	Parâmetro adimensional do fluido power-law
χ	Obstrução do anular (1)
$\delta\bar{v}$	Incerteza da viscosidade cinemática
$\delta\bar{G}_E$	Incerteza expandida de uma grandeza qualquer
ϕ_{Est}	Discriminante de estabilidade (s ⁻²)
ϕ_i	Coeficiente de sensibilidade
ϕ	Variável geral do método numérico
$\dot{\gamma}$	Taxa de deformação (s ⁻¹)
$\dot{\gamma}_{ref}$	Taxa de deformação de referência (s ⁻¹)
η	Viscosidade do fluido newtoniano generalizado (Pa.s)
η_{ref}	Viscosidade de referência do fluido newtoniano generalizado (Pa.s)
η^*	Viscosidade adimensional (1)

φ	Semi-ângulo de obstrução (rad)
λ	Comprimento de onda axial dos vórtices de Taylor (m)
μ	Viscosidade (Pa.s)
$\bar{\mu}$	Viscosidade média (Pa.s)
ν	Viscosidade cinemática (m^2s^{-1})
θ	Ângulo de referência do sistema de coordenadas cilíndricas (rad)
ρ	Massa específica ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
τ	Tensão cisalhante (Pa)
$\bar{\tau}_p$	Tensão cisalhante média sobre a placa de obstrução parcial (Pa)
τ_{yx}	Tensão cisalhante sobre a placa na direção x.
τ_{yz}	Tensão cisalhante sobre a placa na direção z.
ξ	Razão de raios (1)
ψ	Razão entre a rotação dos cilindros externo e interno (1)
Γ	Razão de aspecto (1)
Λ	Razão entre números de Reynolds
$\Delta\Lambda$	Varição entre números de Reynolds para diferentes fluidos
Ω	Frequência angular (s^{-1})
Ω_c	Frequência angular crítica (s^{-1})
Ω_i	Frequência angular do cilindro interno (s^{-1})
Ω_o	Frequência angular do cilindro externo (s^{-1})

*Todas as coisas devem ser feitas do modo mais simples possível,
mas não mais simples do que isso.*

Albert Einstein