

Julio Manuel Barros Junior

**Estudo Experimental do
Escoamento Axial através de
Região Anular com Rotação
do Cilindro Interno**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA**

**Programa de Pós-graduação em
Engenharia Mecânica**

Rio de Janeiro, Setembro de 2007

Julio Manuel Barros Junior

**Estudo Experimental do Escoamento Axial
através de Região Anular com Rotação do
Cilindro Interno**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Prof. Luis Fernando Alzuguir Azevedo

Rio de Janeiro
Setembro de 2007

Julio Manuel Barros Junior

**Estudo Experimental do Escoamento Axial
através de Região Anular com Rotação do
Cilindro Interno**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Luis Fernando Alzuguir Azevedo

Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Prof. Bruno Venturini Loureiro

Faculdade do Centro Leste

Prof. André Leibsohn Martins

CENPES - Petrobrás

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico –
PUC-Rio

Rio de Janeiro, 21 de Setembro de 2007

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

Julio Manuel Barros Junior

Graduou-se em Engenharia Industrial Mecânica no Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET/RJ em 2003

Ficha Catalográfica

Barros Junior, Julio Manuel

Estudo Experimental do Escoamento Axial através de Região Anular com Rotação do Cilindro Interno/ Julio Manuel Barros Junior; orientador: Luis Fernando Alzuguir Azevedo. — Rio de Janeiro : PUC–Rio, Departamento de Engenharia Mecânica, 2007.

125 f. : il ; 30 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Anular concêntrico. 3. PIV. 4. Queda de pressão. 5. Fator de atrito. 6. Campos de velocidade. 7. Escoamento axial. I. Azevedo, Luis Fernando Alzuguir. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Agradecimentos

Ao meu orientador, Luis Fernando Azevedo, pela oportunidade, confiança, atenção, amizade dada a mim e pelas horas de discussões a cerca do trabalho.

Ao meu pai, meu amigo e companheiro, que durante essa jornada mostrou-se ser mais do que ele sempre foi para mim.

À minha mãe, que sempre serviu de exemplo de esforço e dedicação por toda minha vida.

Aos meus amigos da PUC-Rio, Reginaldo, Pedro Canário, Daniel Prata, e especialmente ao Bruno Azevedo, pelos momentos de distração e amizade.

À Bianca, pelo amor, amizade e companheirismo ao longo dos anos que convivemos juntos.

Resumo

Barros Junior, Julio Manuel; Azevedo, Luis Fernando Alzuguir. **Estudo Experimental do Escoamento Axial através de Região Anular com Rotação do Cilindro Interno**. Rio de Janeiro, 2007. 125p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O escoamento entre cilindros concêntricos com rotação do cilindro interno com a imposição de um gradiente axial de pressão foi estudado experimentalmente. A razão de raios era $\eta = 0,64$ e razão de aspecto era $\Gamma = 265$. O fator de atrito e campos de velocidade foram estudados para quatro rotações diferentes do cilindro interno e para os três regimes de escoamento, laminar, transição laminar-turbulento, e turbulento. Os Campos de velocidades foram obtidos através da técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV). Os resultados para os fatores de atrito revelaram que a influência da rotação é mais pronunciada para regimes laminares e de transição. Para estes dois regimes o aumento observado foi de 100% de f/f_0 . Para o regime de escoamento turbulento, o aumento foi decrescendo gradativamente até o valor de 10% de f/f_0 para $Re_{axial} = 8458$. Os campos de velocidade instantâneos relevaram padrões complexos do escoamento. Os perfis de velocidade axial médios tomavam uma forma achatada com o aumento da rotação do cilindro interno e do número de Reynolds axial. Para o regime de escoamento turbulento a influência da rotação do cilindro nos perfis de velocidade era pequena.

Palavras-chave

anular concêntrico, PIV, queda de pressão, fator de atrito, campos de velocidade, escoamento axial

Abstract

Barros Junior, Julio Manuel; Azevedo, Luis Fernando Alzuguir. **Experimental Study of Axial Flow through and Annular Region with Inner Cylinder Rotation.** Rio de Janeiro, 2007. 125p. MSc. Dissertation — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The flow between concentric cylinders with an inner rotating cylinder with an imposed pressure-driven axial flow was studied experimentally. The radius ratio was $\eta = 0,64$ and the aspect ration was $\Gamma = 265$. Friction factor and velocity fields were studied for four rotations of the inner cylinder and for laminar, transitional, and turbulent flow. Velocity fields were measure by Particle Image Velocimetry (PIV). The results for friction factor showed that the influence of the rotation is more apparent for laminar and transitional flow, increasing with the rotation of the inner cylinder. For these two flows, the increasing was 100% of f/f_0 . For turbulent flow, the increasing was gradually decreasing to 10% of f/f_0 for $Re_{axial} = 8458$. Instantaneous velocity fields showed complex flow patterns. The time average axial velocity profiles showed a top hat like form with the increasing of inner cylinder rotation and axial Reynolds numbers. For turbulent flow, the influence of rotation in the velocity profiles was small.

Keywords

concentric annulus, PIV, pressure drop, friction factor, velocity fields, axial flow

Sumário

1	Introdução	16
1.1	Revisão Bibliográfica	17
2	Experimentos	22
2.1	Seção de testes	22
2.1.1	Visão geral da seção de testes	23
2.2	Montagem experimental	25
2.2.1	Tubo interno de alumínio	25
2.2.2	Tubo externo de acrílico	26
2.2.3	Mesa de apoio	30
2.2.4	Caixas de entrada e saída	30
2.2.5	Sistema de alimentação de fluido	33
2.2.6	Transmissão de potência para a rotação do eixo de alumínio	36
2.2.7	Medição de velocidade angular	37
2.3	Medição da queda de pressão	38
2.4	Medição dos Campos de Velocidade	41
2.5	Redução de dados	44
2.5.1	Número de Reynolds	45
2.5.2	Número de Reynolds rotacional	45
2.5.3	Fator de Atrito	46
2.5.4	Exemplo de Redução de Dados	46
3	Velocimetria por Imagem de Partícula	49
3.1	Partículas traçadoras	51
3.1.1	Propriedades fluido mecânicas	51
3.1.2	Espalhamento de Luz	52
3.2	Iluminação por Laser	53
3.3	Captura das Imagens	54
3.4	Formação da Imagem	55
3.5	Análise das Imagens	56
3.5.1	Técnicas avançadas	59
3.6	Pós-Processamento	60
4	Resultados e Discussões	62
4.1	Qualificação da Seção de Testes	62
4.1.1	Queda de Pressão e Fator de Atrito	63
4.1.2	Perfis de Velocidade na Região Desenvolvida	67
4.2	Efeito da Rotação do Cilindro Interno	70
4.2.1	Efeito da Rotação do Cilindro Interno na Queda de Pressão e Fator de Atrito	71
4.2.2	Efeito da Rotação do Cilindro Interno nos Campos de Velocidade	74
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	102

5.1	Conclusões	102
5.2	Recomendações para Trabalhos Futuros	103
	Referências Bibliográficas	105
	A Calibração dos Rotômetros	107
	B Análise de Incerteza	109
B.1	Análise de incerteza na Pressão Estática	109
B.2	Análise de incerteza no fator de atrito	110
B.3	Análise de Incerteza no campo de velocidade	111
	C Figuras dos Campos Instatâneos	114

Lista de Figuras

1.1	Desenho feito por G. I. Taylor (1923) mostrando as linhas de corrente depois que ocorre a instabilidade (vórtices de Taylor).	18
1.2	Mapa da transição entre os vários regimes investigados por Lueptow et al. (1992)	20
2.1	Figura esquemática da seção de testes montada.	24
2.2	Foto da luva de união dos tubos de alumínio.	26
2.3	Foto da tampa do eixo de alumínio.	26
2.4	Desenho técnico da luva de polipropileno com o parafuso centralizador.	27
2.5	Figura esquemática da luva de polipropileno.	28
2.6	Figura esquemática da montagem da luva nos tubos de acrílico.	28
2.7	Foto da luva de polipropileno apoiada na cantoneira.	29
2.8	Desenho Ilustrativo da mesas de apoio construídas.	31
2.9	Figura ilustrando a seção de testes.	32
2.10	Ilustração da caixa de entrada.	33
2.11	Ilustração da caixa de saída.	34
2.12	Tanque superior.	34
2.13	Fotos dos rotâmetros utilizados para a leitura da vazão.	35
2.14	Foto do tanque inferior, bomba centrífuga, inversor de frequência e válvula gaveta.	36
2.15	Sistema de transmissão de potência para a rotação do cilindro interno.	37
2.16	Encoder utilizado na medição da velocidade angular do cilindro interno.	38
2.17	Foto das tomadas de pressão.	39
2.18	Ilustração do vazo seletor das tomadas de pressão.	40
2.19	Ilustração do manômetro tipo "U" invertido.	41
2.20	Manometro do tipo "U" invertido construído.	42
2.21	Representação esquemática da montagem do sistema de PIV na seção de testes. Vista lateral.	43
2.22	Representação esquemática da montagem do sistema de PIV na seção de testes. Vista lateral.	43
2.23	Gráfico Pressão <i>versus</i> Posição para $Re_{axial} = 8458$ sem rotação do cilindro interno	48
3.1	Figura ilustrando a técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas. (fonte: http://www.dantecdynamics.com).	49
3.2	Espalhamento de luz de uma partícula de vidro de $10\mu m$ de diâmetro em água. Comprimento da luz incidente $\lambda = 532nm$. (fonte:MiePlot).	52
3.3	Esquema de um laser de Nd:YAG e seus componentes.	53
3.4	Sensor de CCD usado nas câmeras de PIV.	55
3.5	Ilustração da formação de uma imagem de PIV	56

3.6	A função correlação cruzada R_{II} (esquerda) calculada a partir da correlação das duas janelas de interrogação I e I' ambas com 64x64 pixels de dimensão.	57
3.7	Idealização dos pontos do pico de correlação usados para a determinação do deslocamento fracional (sub-pixels)	58
4.1	Distribuição de pressão ao longo da seção de testes para $Re = 5021$, sem rotação do cilindro interno.	64
4.2	Comparação entre fatores de atrito medidos e da literatura para $Re_{rot} = 0$. Dados da literatura de White (1978) e Miller de acordo com Fox & McDonald (1998). Razão de raios, $\eta = 0,64$.	66
4.3	Ilustração da coordenada adimensional radial utilizada.	68
4.4	Perfis de Velocidade Axial Média para Regime de Escoamento Laminar. Razão de raios, $\eta = 0,64$.	68
4.5	Comparação entre os Perfis de Velocidade Axial Média. Resultado de DNS para $Re = 8900$ e razão de raios igual a 0,5 (Chung <i>et al.</i> , 2002).	70
4.6	Efeito da rotação do cilindro interno sobre o fator de atrito.	72
4.7	Efeito da rotação sobre o fator de atrito. Razão entre fator de atrito com rotação e sem rotação, f/f_0 .	73
4.8	Comparação entre os resultados experimentais do presente trabalho com os dados de Escudier & Gouldson (1995).	74
4.9	Campo de velocidade instantâneo para escoamento axial com rotação do cilindro interno, para $Re_{axial} = 225$ e $Re_{rot} = 900$. Escoamento axial da direita para a esquerda.	77
4.10	Campo de Velocidade instantâneo subtraído do perfil de velocidade axial, para $Re_{axial} = 225$ e $Re_{rot} = 900$.	78
4.11	Mapa diferenciando os padrões de escoamento identificados por este trabalho.	79
4.12	Campos Instantâneos de Velocidade para $RR=1,33$ ($Re_{axial} = 225$ e $Re_{rot} = 300$) (Escoamento com vórtices aleatórios-EVA).	81
4.13	Campos Instantâneos de Velocidade para $RR=2,22$ ($Re_{axial} = 225$ e $Re_{rot} = 500$) (Escoamento com vórtices-EV), $d_v = 29,3mm$.	83
4.14	Campos Instantâneos de Velocidade para $RR=3,11$ ($Re_{axial} = 225$ e $Re_{rot} = 700$) (Escoamento com vórtices-EV), $d_v = 25mm$.	84
4.15	Campos Instantâneos de Velocidade para $RR=4,00$ ($Re_{axial} = 225$ e $Re_{rot} = 900$) (Escoamento com vórtices-EV), $d_v = 15mm$.	85
4.16	Campos Instantâneos de Velocidade para $RR=0,9$ ($Re_{axial} = 332$ e $Re_{rot} = 300$) (Escoamento com vórtices aleatórios-EVA).	86
4.17	Campos Instantâneos de Velocidade para $RR=1,51$ ($Re_{axial} = 332$ e $Re_{rot} = 500$) (Escoamento com vórtices aleatórios-EVA).	87
4.18	Campos Instantâneos de Velocidade para $RR=2,11$ ($Re_{axial} = 332$ e $Re_{rot} = 700$) (Escoamento com vórtices aleatórios-EVA).	88
4.19	Campos Instantâneos de Velocidade para $RR=2,71$ ($Re_{axial} = 332$ e $Re_{rot} = 900$) (Escoamento com vórtices-EV), $d_v = 28,5mm$.	89

4.20	Campos Instantâneos de Velocidade para $RR=0,45$ ($Re_{axial} = 663$ e $Re_{rot} = 300$) (Escoamento sem a presença de vórtices-ESV).	91
4.21	Comparação entre os campos de velocidade para $Re_{axial} = 3428$ (Escoamento turbulento-ET).	92
4.22	Comparação entre os campos de velocidade para $Re_{axial} = 5022$ (Escoamento turbulento-ET).	92
4.23	Comparação entre os campos de velocidade para $Re_{axial} = 6847$ (Escoamento turbulento-ET).	93
4.24	Comparação entre os campos de velocidade para $Re_{axial} = 8458$ (Escoamento turbulento-ET).	93
4.25	Comparação dos perfis de velocidade axial médio para três rotações do cilindro interno e $Re_{axial} = 225$.	94
4.26	Comparação dos perfis de velocidade axial médio para três rotações do cilindro interno e $Re_{axial} = 332$.	95
4.27	Comparação dos perfis de velocidade axial médio para três rotações do cilindro interno e $Re_{axial} = 622$.	95
4.28	Comparação dos perfis de velocidade axial médio para três rotações do cilindro interno e $Re_{axial} = 979$.	96
4.29	Comparação dos perfis de velocidade axial médio para três rotações do cilindro interno e $Re_{axial} = 1287$.	96
4.30	Comparação dos perfis de velocidade axial médio para três rotações do cilindro interno e $Re_{axial} = 3428$.	97
4.31	Comparação dos perfis de velocidade axial médio para três rotações do cilindro interno e $Re_{axial} = 5021$.	98
4.32	Comparação dos perfis de velocidade axial médio para três rotações do cilindro interno e $Re_{axial} = 6847$.	98
4.33	Comparação dos perfis de velocidade axial médio para três rotações do cilindro interno e $Re_{axial} = 8456$.	99
4.34	Varição da velocidade axial rms com o aumento do Re_{axial} para a posição $y/\delta = 1, 65$.	101
B.1	Erro sistemático no deslocamento para o diâmetro da imagem da partícula. Fonte: Foucaut <i>et al.</i> (2004)	112
B.2	Erro aleatório no deslocamento para o diâmetro da imagem da partícula. Fonte: Foucaut <i>et al.</i> (2004)	113
C.1	Campos Instantâneos de Velocidade para $RR=0,76$ ($Re_{axial} = 662$ e $Re_{rot} = 500$). Escoamento com vórtices aleatórios (EVA).	115
C.2	Campos Instantâneos de Velocidade para $RR=1,06$ ($Re_{axial} = 662$ e $Re_{rot} = 700$). Escoamento com vórtices aleatórios (EVA).	116
C.3	Campos Instantâneos de Velocidade para $RR=1,36$ ($Re_{axial} = 662$ e $Re_{rot} = 900$). Escoamento com vórtices aleatórios (EVA).	117
C.4	Campos Instantâneos de Velocidade para $RR=0,31$ ($Re_{axial} = 980$ e $Re_{rot} = 300$). Escoamento sem vórtices (ESV).	118
C.5	Campos Instantâneos de Velocidade para $RR=0,51$ ($Re_{axial} = 980$ e $Re_{rot} = 500$). Escoamento com vórtices aleatórios (EVA).	119
C.6	Campos Instantâneos de Velocidade para $RR=0,72$ ($Re_{axial} = 980$ e $Re_{rot} = 700$). Escoamento com vórtices aleatórios (EVA).	120

C.7	Campos Instantâneos de Velocidade para $RR=0,92$ ($Re_{axial} = 980$ e $Re_{rot} = 900$). Escoamento com vórtices aleatórios (EVA).	121
C.8	Campos Instantâneos de Velocidade para $RR=0,23$ ($Re_{axial} = 1288$ e $Re_{rot} = 300$). Escoamento sem vórtices (ESV).	122
C.9	Campos Instantâneos de Velocidade para $RR=0,39$ ($Re_{axial} = 1288$ e $Re_{rot} = 500$). Escoamento sem vórtices (ESV).	123
C.10	Campos Instantâneos de Velocidade para $RR=0,54$ ($Re_{axial} = 1288$ e $Re_{rot} = 700$). Escoamento sem vórtices (ESV).	124
C.11	Campos Instantâneos de Velocidade para $RR=0,70$ ($Re_{axial} = 1288$ e $Re_{rot} = 900$). Escoamento com vórtices aleatórios (EVA).	125

Lista de Tabelas

2.1	Dados obtidos na leitura do manômetro e a pressão corrigida pela equação (2-1.). $Re_{axial} = 8458$ sem rotação do cilindro interno	47
4.1	Comparação entre fatores de atrito hidrodinâmicos.	65
4.2	Comparação entre as Vazões Calibradas e Vazões Integrando o Perfil de Velocidade para Regime de Escoamento Laminar	69
4.3	Comparação entre as Vazões Lidas no Rotâmetro e Vazões Integrando o Perfil de Velocidade para Regime de Escoamento Turbulento.	70
4.4	Efeito da rotação do cilindro interno sobre o fator de atrito.	71
4.5	Efeito da Rotação do cilindro interno sobre o Fator de Atrito: Razão f/f_0 .	73
4.6	Razão entre Valores de Reynolds Rotacional e Reynolds Axial Investigados.	75
A.1	Vazões encontradas pela calibração dos rotômetros.	108
B.1	Resultado encontrado para o diâmetro da imagem da partículas	112

Lista de Símbolos

Letras Gregas

α : Ângulo de inclinação do manômetro

δ : Metade do comprimento do espaço anular (m)

δ_c : Incerteza

δ_z : Espessura focal (m)

η : Razão de raios

Γ : Razão de apécto

Ω : Velocidade angular do cilindro interno (rad/s)

λ : Comprimento de onda da luz (nm)

ρ : massa específica do fluido ($\frac{kg}{m^3}$)

ρ_p : massa específica da partícula ($\frac{kg}{m^3}$)

μ : Viscosidade dinâmica do fluido (Pa.s)

τ_s : Tempo de relaxação (s)

Letras Latinas

A : Área transversal do anular (m^2)

d_p : diâmetro da partícula (m)

d_τ : Diâmetro da imagem da partícula (pixels)

d_{dif} : Diâmetro da imagem da partícula por efeito de difração (pixels)

D_H : Diâmetro hidráulico (m)

$\Delta P/L$: Gradiente de pressão ($\frac{Pa}{m}$)

f : Fator de atrito hidrodinâmico

f_0 : Fator de atrito hidrodinâmico sem rotação do cilindro interno

$f_\#$: número de f da lente

g : Aceleração da gravidade ($\frac{m}{s^2}$)

h : leitura de pressão no manômetro (mm)

M : Magnificação da Imagem

r_i : Raio interno do espaço anular (m)

r_e : Raio externo do espaço anular (m)

Re_{axial} : Número de Reynolds axial

Re_{rot} : Número de Reynolds rotacional

RR: Razão entre Reynolds axial e Reynolds rotacional

Q : Vazão volumétrica ($\frac{m^3}{s}$)

u_z : Velocidade na direção axial (m/s)

u' : Velocidade axial rms (m/s)

U : Velocidade média na seção transversal do anular (m/s)

U_p : Velocidade da partícula (m/s)

U_s : Velocidade de atraso da partícula (m/s)

y/δ : coordenada adimensional radial

z_0 : Distância entre a lente e o sensor da câmera (m)

Z_0 : Distância entre o objeto e a lente da câmera (m)