UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MEDIÇÃO DE VAZÃO EM TUBOS DE PEQUENO DIÂMETRO UTILIZANDO ORIFÍCIOS INTEGRAIS

Marcelo Filardi

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Said Mansur
Co-orientador: Prof. Dr. Edson Del Rio Vieira

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia - UNESP – Campus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.
Área de Conhecimento: Ciências Térmicas

Ilha Solteira – SP
Dezembro/2012

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação

F484m

Filardi, Marcelo.
Medição de vazão em tubos de pequeno diâmetro utilizando orifícios integrais / Marcelo Filardi. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2012
178 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Mecânica dos Fluidos, 2012

Orientador: Sérgio Said Mansur
Coorientador: Edson Del Rio Vieira
Inclui bibliografia

1. Orifício integral. 2. Medição de vazão. 3. Coeficiente de descarga.

unesp **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**

CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Medição de vazão em tubos de pequeno diâmetro utilizando orifícios integrais

AUTOR: MARCELO FILARDI

ORIENTADOR: Prof. Dr. SERGIO SAID MANSUR

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. EDSON DEL RIO VIEIRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica , Área: CIÊNCIAS TÉRMICAS, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. SERGIO SAID MANSUR
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. JOÃO BATISTA CAMPOS SILVA
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. VICENTE LUIZ SCALON
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru

Data da realização: 05 de dezembro de 2012.

A Deus.

À minha esposa Rosemeire, aos meus pais, aos meus filhos e aos amigos, pelo grande apoio concedido para que esse projeto se tornasse realidade.

Agradecimentos

- *A Deus.*
- *Aos Professores Sérgio Mansur e Edson Del Rio, pela orientação e amizade, das quais desfrutei ao longo dos últimos anos.*
- *Ao corpo docente do Departamento de Engenharia Mecânica, que me proporcionou auxílios e confiança para que este projeto se tornasse realidade.*
- *Ao técnico Edivaldo, do Departamento de Engenharia Mecânica, pelo auxílio na confecção de peças e na montagem da instalação experimental.*
- *Aos amigos Mateus e João, do curso de graduação em Engenharia Mecânica, pelo auxílio na coleta de dados.*
- *À Smar, pelo apoio e pelo empréstimo de equipamentos para a realização deste trabalho. Em especial, sou grato aos amigos Libânio, Cesar, Evaristo, Ivan, Caum e Thiago, do Departamento de Desenvolvimento Mecânico.*
- *A minha esposa Rosemeire, que me apoiou em todos os momentos dessa jornada.*
- *Aos meus filhos Guilherme e Beatriz, que suportaram a ausência do pai nas horas de lazer.*
- *A minha irmã Rita, pelo pensamento positivo.*
- *Aos meus pais Aloísio e Carmelita, pelo exemplo de vida e incentivo.*

Resumo

Orifício integral é um medidor de vazão industrial útil para as linhas de pequeno diâmetro (tipicamente até 38 mm), que permite um alinhamento muito preciso do conjunto. No presente trabalho, foram realizados vários experimentos utilizando orifícios integrais em tubos de PVC de ½ polegada, para verificar a influência da rugosidade do tubo, da excentricidade do furo e da geometria do orifício nas medições de vazão. Experimentos adicionais foram feitos para verificar influências de fabricação e a interferência da rugosidade do tubo sobre a operação do equipamento. Os coeficientes de descarga foram obtidos em função do número de Reynolds e, posteriormente, comparados entre si e com a literatura (fabricantes e normas). Os resultados mostraram que os orificios concêntricos com borda em canto vivo permitem operação em uma ampla faixa de Reynolds, além de apresentarem um processo de produção mais barato e uma boa precisão. Uma equação representativa do coeficiente de descarga foi proposta para este tipo de placa.

Palavras chave: Orifício integral. Medição de vazão. Coeficiente de descarga.

Abstract

Integral orifice is an industrial flowmeter useful for small diameter lines (*typically up to 38 mm*), *which provides a very precise alignment. In the present work, experiments have been performed using integral orifices in ½ inch PVC pipes, in order to check the influence of the tube roughness, the eccentricity of the hole and orifice geometry in the flow measurements. Additional experiments have been carried out to verify the influence of the manufacturing process and the roughness in tubes on the equipment operation. Discharge coefficients have been obtained for the different orifices as a function of the Reynolds number. Results have been compared to each other and with data from the literature* (*manufacturers and standards*). *Results show that concentric plates with square edge permit operation in a wide Reynolds number range, allied a cheaper manufacturing process and a good accuracy. A representative equation for the discharge coefficient of such a plate has been determined.*

Keywords: Integral orifice. Flow measurement. Discharge coefficient.

Lista de Figuras

Figura 1.1	Corpo orifício integral e placa de orifício (a), Conjunto orifício integral e transmissor de pressão diferencial (b).	4
Figura 2.1	Projeto do orifício	6
Figura 2.2	Aparato para calibração dos medidores de orifício	8
Figura 2.3	Descarga de ar através dos orifícios a 21,11 ºC e 85% de umidade relativa.	9
Figura 2.4	Coeficiente de descarga para orifício número 44.	9
Figura 2.5	Variação do coeficiente de descarga com as respectivas áreas a diferentes pressões P_1.	10
Figura 2.6	Geometria dos orifícios.	11
Figura 2.7	Coeficiente de descarga *versus* a raiz quadrada da relação de pressão diferencial pela pressão	12
Figura 3.1	Orifício integral e transmissor de pressão diferencial.	16
Figura 3.2	Orifício integral (corte longitudinal).	17
Figura 3.3	Orifício integral (corte do modelo utilizado no experimento).	17
Figura 3.4	Orifício integral Foxboro, (a) in-line e (b) u-bend.	18
Figura 3.5	Secção tubular.	19
Figura 3.6	Aplicação de alguns elementos deprimogênios em função do número de Reynolds.	21
Figura 3.7	Linha de corrente na horizontal.	25
Figura 4.1	Esquema da bancada experimental.	29
Figura 4.2	Vista da bancada experimental.	31
Figura 4.3	Sistema de aquisição de dados.	31
Figura 4.4	Fonte de alimentação, módulo de conversão e controlador digital.	31
Figura 4.5	Orifício integral e transmissor de pressão.	32
Figura 4.6	Tanque de estabilização.	32
Figura 4.7	Balança digital e recipiente de coleta.	32
Figura 4.8	Orifício com furo concêntrico, diâmetro 3,80 mm e borda em canto vivo.	33
Figura 4.9	Orifício com furo concêntrico, diâmetro 3,80 mm e borda em ¼ de círculo.	33
Figura 4.10	Orifício com furo 3,80 mm, borda concêntrica e excentricidades *d*/2.	34
Figura 4.11	Orifício com furo 3,80 mm, borda concêntrica e excentricidades *d*/4.	34
Figura 4.12	Corpo orifício integral de ½".	34
Figura 4.13	Montagem corpo integral de ½", orifício e transmissor de pressão.	35
Figura 4.14	Tubo 1 (a) e Tubo 2 (b) com perfil do dente quadrado.	35
Figura 4.15	Gráfico de coleta de pressão diferencial *versus* do tempo do tratamento.	36
Figura 4.16	Gráfico da vazão *versus* pressão diferencial.	37
Figura 4.17	Inserção da sonda de filme quente: vista (a) e vista (b).	37
Figura 4.18	Tensão de saída *versus* tempo para o Tratamento IT001, Tubo 1, *Re* = 7321..	38
Figura 4.19	Amplitude espectral *versus* frequência para o Tratamento IT001.	39
Figura 4.20	Densidade espectral de potência *versus* frequência para o Tratamento IT001.	39
Figura 4.21	Transmissor de pressão diferencial.	40

Figura 4.22	Controlador digital.	41
Figura 4.23	Módulo de conversão de sinal.	41
Figura 4.24	Fonte de alimentação 24 V.	41
Figura 4.25	Balança digital.	42
Figura 4.26	Termômetro de coluna de mercúrio.	42
Figura 4.27	Cronômetro digital	42
Figura 4.28	Sonda anemométrica	43
Figura 4.29	Anemômetro de fio quente de temperatura constante *Dantec StreamLine*.	43
Figura 5.1	Histerese do coeficiente de descarga.	44
Figura 5.2	Curva da vazão experimental *versus* Pressão diferencial, Tratamento E001.	45
Figura 5.3	Curva coeficiente de descarga *versus* número de Reynolds, Tratamento E001.	46
Figura 5.4	Curva de ajuste variável para coeficiente de descarga, para o Tratamento E001.	47
Figura 5.5	Curva de ajuste constante para coeficiente de descarga, para o Tratamento E001.	48
Figura 5.6	Desvio da vazão para o Tratamento E001.	49
Figura 5.7	Desvio de *C* para o Tratamento E001.	51
Figura 5.8	Desvio *C* com ajuste variável para o Tratamento E001.	53
Figura 5.9	Desvio de *C* com ajuste constante para o Tratamento E001.	53
Figura 5.10	Curvas para Equações (5.2) e (5.3) unificadas.	54
Figura 5.11	Desvio de *C* para equação unificada, para o Tratamento E001.	55
Figura 5.12	Desvio de *C* para equação unificada, para o Tratamento E002	55
Figura 5.13	Desvio de *C* para equação unificada, para o Tratamento E003.	56
Figura 5.14	Comparativo de coeficientes para o tratamento E001.	57
Figura 5.15	Comparativo de coeficientes para o tratamento E002.	57
Figura 5.16	Comparativo de coeficientes para o tratamento E003.	58
Figura 5.17	Comparativo de coeficientes para o tratamento E031.	58
Figura 5.18	Comparativo de coeficientes para o tratamento E032.	59
Figura 5.19	Comparativo de coeficientes para o tratamento E033.	59
Figura 5.20	Resultado de *C* em função do número de Reynolds para o tubo 1.	60
Figura 5.21	Resultado de *C* em função do número de Reynolds para o tubo 2.	61
Figura 5.22	Resultado de *C* em função do número de Reynolds para os tubos 1 e 2.	61
Figura 5.23	Intensidade turbulenta do escoamento dentro de tubos *versus* número de Reynolds.	63
Figura A.1	Transmissor de pressão diferencial.	71
Figura A.2	Imagem de escoamento dentro de uma secção com estrangulamento.	72
Figura A.3	Tipos de placas de orifício.	72
Figura A.4	Tipos de bordas: (a) canto vivo, (b) ¼ de circulo e (c) entrada cônica.	73
Figura A.5	Bocal de vazão.	74
Figura A.6	Venturi calandrado e soldado.	74
Figura A.7	Tubo Prandtl ou tubo Pitot.	75
Figura A.8	Tubo Pitot original.	76
Figura A.9	Tubo Prandtl, ou tubo Pitot em tubulação.	76
Figura A.10	Tubo pitot multifuros.	77
Figura A.11	Esquema dos medidores tipo Pitot Multifuros.	78

Figura A.12	Rotâmetro.	79
Figura A.13	Força de Coriolis em medidores.	79
Figura A.14	Partes do medidor de vazão por efeito Coriolis.	80
Figura A.15	Medidor de vazão por efeito Coriolis.	80
Figura A.16	Funcionamento do medidor magnético.	81
Figura A.17	Medidor magnético.	81
Figura A.18	Rotor radial.	83
Figura A.19	Medidor de vazão turbina.	83
Figura A.20	Micro turbina, com rotor tangêncial.	83
Figura A.21	Medidor ultra-sônico.	84
Figura A.22	Esquema de funcionamento, baseado no efeito Doppler.	84
Figura A.23	Esquema de funcionamento, baseado no tempo de trânsito.	85
Figura A.24	Medidor de vórtices.	86
Figura A.25	Esquema de formação de vórtices.	86
Figura A.26	Vertedouros triangulares.	88
Figura A.27	Calha Parshall.	88
Figura B.1	Software de monitoramento Smar.	94
Figura B.2	Incertezas sistemáticas do transmissor de pressão.	96
Figura B.3	Incerteza aleatória do transmissor de pressão para E001.	96
Figura B.4	Incerteza aleatória do transmissor de pressão para E002.	97
Figura B.5	Incerteza aleatória do transmissor de pressão para E003.	97
Figura C.1	Aparato experimental de Reynolds.	111
Figura D.1	Gráficos para o Tratamento E001.	114
Figura D.2	Gráficos para o Tratamento E002.	115
Figura D.3a	Gráficos para o Tratamento E003.	116
Figura D.3b	Gráficos para o Tratamento E003, continuação.	117
Figura D.4	Gráficos para o Tratamento E004.	118
Figura D.5	Gráficos para o Tratamento E005.	119
Figura D.6	Gráficos para o Tratamento E006.	120
Figura D.7	Gráficos para o Tratamento E007.	121
Figura D.8	Gráficos para o Tratamento E008.	122
Figura D.9	Gráficos para o Tratamento E009.	123
Figura D.10	Gráficos para o Tratamento E010.	124
Figura D.11	Gráficos para o Tratamento E011.	125
Figura D.12	Gráficos para o Tratamento E012.	126
Figura D.13	Gráficos para o Tratamento E013.	127
Figura D.14	Gráficos para o Tratamento E014.	128
Figura D.15	Gráficos para o Tratamento E015.	129
Figura D.16	Gráficos para o Tratamento E016.	130
Figura D.17	Gráficos para o Tratamento E017.	131
Figura D.18	Gráficos para o Tratamento E018.	132
Figura D.19	Gráficos para o Tratamento E019.	133
Figura D.20	Gráficos para o Tratamento E020.	134
Figura D.21	Gráficos para o Tratamento E021.	135
Figura D.22	Gráficos para o Tratamento E022.	136
Figura D.23	Gráficos para o Tratamento E023.	137
Figura D.24	Gráficos para o Tratamento E024.	138
Figura D.25	Gráficos para o Tratamento E025.	139
Figura D.26	Gráficos para o Tratamento E026.	140
Figura D.27	Gráficos para o Tratamento E027.	141

Figura D.28 Gráficos para o Tratamento E028. 142
Figura D.29 Gráficos para o Tratamento E029. 143
Figura D.30 Gráficos para o Tratamento E030. 144
Figura D.31 Gráficos para o Tratamento E031. 145
Figura D.32 Gráficos para o Tratamento E032. 146
Figura D.33 Gráficos para o Tratamento E033. 147
Figura D.34 Gráfico de tensão de saída *versus* tempo para o Tratamento IT001. 148
Figura D.35 Gráficos de frequência para o Tratamento IT001. 148
Figura D.36 Gráfico de tensão de saída *versus* tempo para o Tratamento IT002. 149
Figura D.37 Gráficos de frequência para o Tratamento IT002. 149
Figura D.38 Gráfico de tensão de saída *versus* tempo para o Tratamento IT003. 150
Figura D.39 Gráficos de frequência para o Tratamento IT003. 150
Figura D.40 Gráfico de tensão de saída *versus* tempo para o Tratamento IT004. 151
Figura D.41 Gráficos de frequência para o Tratamento IT004. 151
Figura D.42 Gráfico de tensão de saída *versus* tempo para o Tratamento IT005. 152
Figura D.43 Gráficos de frequência para o Tratamento IT005. 152
Figura D.44 Gráfico de tensão de saída *versus* tempo para o Tratamento IT006. 153
Figura D.45 Gráficos de frequência para o Tratamento IT006. 153
Figura D.46 Gráfico de tensão de saída *versus* tempo para o Tratamento IT007. 154
Figura D.47 Gráficos de frequência para o Tratamento IT007. 154
Figura D.48 Gráfico de tensão de saída *versus* tempo para o Tratamento IT008. 155
Figura D.49 Gráficos de frequência para o Tratamento IT008. 155
Figura D.50 Gráfico de tensão de saída *versus* tempo para o Tratamento IT009. 156
Figura D.51 Gráficos de frequência para o Tratamento IT009. 156
Figura D.52 Gráfico de tensão de saída *versus* tempo para o Tratamento IT010. 157
Figura D.53 Gráficos de frequência para o Tratamento IT010. 157
Figura D.54 Gráfico de tensão de saída *versus* tempo para o Tratamento IT011. 158
Figura D.55 Gráficos de frequência para o Tratamento IT011. 158
Figura D.56 Gráfico de tensão de saída *versus* tempo para o Tratamento IT012. 159
Figura D.57 Gráficos de frequência para o Tratamento IT012. 159
Figura D.58 Gráfico de tensão de saída *versus* tempo para o Tratamento IT013. 160
Figura D.59 Gráficos de frequência para o Tratamento IT013. 160
Figura D.60 Gráfico de tensão de saída *versus* tempo para o Tratamento IT014. 161
Figura D.61 Gráficos de frequência para o Tratamento IT014. 161
Figura D.62 Gráfico de tensão de saída *versus* tempo para o Tratamento IT015. 162
Figura D.63 Gráficos de frequência para o Tratamento IT015. 162

Lista de Tabelas

Tabela 1.1	Grupos de medidores.	3
Tabela 2.1	Diâmetros dos orifícios.	7
Tabela 2.2	Equação do coeficiente de descarga *C*.	10
Tabela 3.1	Parâmetros para cálculo do coeficiente de descarga preconizados pelos fabricantes Foxboro e Rosemount.	23
Tabela 3.2	Coeficiente de vazão (*K*) do orifício.	23
Tabela 4.1	Detalhamento dos tratamentos experimentais.	30
Tabela 5.1	Parâmetros para a Equação (5.1).	49
Tabela 5.2	Parâmetros para a Equação (5.2).	50
Tabela 5.3	Parâmetros para a Equação (5.3).	52
Tabela B.1	Incertezas sistemáticas do transmissor de pressão.	95
Tabela B.2	Incertezas relativas de pressão diferencial por faixa de Reynolds.	98
Tabela B.3	Incertezas relativas da temperatura por diâmetros.	98
Tabela B.4	Incertezas relativas da densidade por diâmetros.	100
Tabela B.5	Incertezas relativas da viscosidade por diâmetros.	100
Tabela B.6	Incertezas relativas da massa por faixa de Reynolds.	101
Tabela B.7	Incertezas relativas de tempo por faixa de Reynolds.	102
Tabela B.8	Incertezas relativas da vazão real por faixa de Reynolds.	103
Tabela B.9	Incertezas relativas da vazão teórica por faixa de Reynolds.	106
Tabela B.10	Incertezas relativas do Número de Reynolds por faixa de Reynolds.	108
Tabela B.11	Incertezas relativas do Coeficiente de Descarga *C* por faixa de Reynolds.	109
Tabela D	Detalhamento das figuras e tabelas por experimento.	113
Tabela D.1	Tratamento E001.	114
Tabela D.2	Tratamento E002.	115
Tabela D.3	Tratamento E003.	117
Tabela D.4	Tratamento E004.	118
Tabela D.5	Tratamento E005.	119
Tabela D.6	Tratamento E006.	120
Tabela D.7	Tratamento E007.	121
Tabela D.8	Tratamento E008.	122
Tabela D.9	Tratamento E009.	123
Tabela D.10	Tratamento E010.	124
Tabela D.11	Tratamento E011.	125
Tabela D.12	Tratamento E012.	126
Tabela D.13	Tratamento E013.	127
Tabela D.14	Tratamento E014.	128
Tabela D.15	Tratamento E015.	129
Tabela D.16	Tratamento E016.	130
Tabela D.17	Tratamento E017.	131
Tabela D.18	Tratamento E018.	132
Tabela D.19	Tratamento E019.	133
Tabela D.20	Tratamento E020.	134
Tabela D.21	Tratamento E021.	135
Tabela D.22	Tratamento E022.	136
Tabela D.23	Tratamento E023.	137

Tabela D.24 Tratamento E024. 138
Tabela D.25 Tratamento E025. 139
Tabela D.26 Tratamento E026. 140
Tabela D.27 Tratamento E027. 141
Tabela D.28 Tratamento E028. 142
Tabela D.29 Tratamento E029. 143
Tabela D.30 Tratamento E030. 144
Tabela D.31 Tratamento E031. 145
Tabela D.32 Tratamento E032. 146
Tabela D.33 Tratamento E033. 147

Lista de Símbolos

B	Densidade de fluxo magnético [Tesla]
C_s	Velocidade do som no meio [m/s]
d	Diâmetro do orifício [mm]
d_{ab}	Distância entre as secções retas que passam pelos dois transdutores [m]
da	Afastamento do tubo [m]
D_a	Dimensão do anteparo [m]
D	Diâmetro interno do tubo [mm]
De	Distância entre eletrodos [m]
g	Aceleração da gravidade [m/s^2]
f	Freqüência de emissão de vórtices [Hz]
f_1	Freqüência emitida pelos Transdutores [Hz]
f_2	Freqüência Refletida [Hz]
$\vec{f}_c$	Força de Coriolis [kgf]
L_1	Distância da tomada de pressão a montante [mm]
L_2	Distância da tomada de pressão a jusante [mm]
L_{ab}	Percurso entre os dois transdutores [m]
Lt	Comprimento do Tubo [m]
m	Massa [kg]
M'_2	Termo da tomada de pressão [mm]
P	Pressão [Pa]
P_1	Pressão a montante [Pa]
P_2	Pressão a jusante [Pa]
Q	Vazão a montante ao orifício [kg/s]
Q'	Vazão a jusante ao orifício[kg/s]
$Qreal_{mássica}$	Vazão real mássica [kg/s]
$Qreal_{vol}$	Vazão real volumétrica [m^3/s, l/min]
$Qteórica_{mássica}$	Vazão teórica mássica [kg/s]
$Qteórica_{vol}$	Vazão teórica volumétrica [m^3/s, l/min]
S	Secção de Área do tubo [m^2]
S_1	Área para seção 1 [m^2]
S_2	Área para seção 2 [m^2]
t	Tempo [s]
t_{ab}	Tempo que o ultra-som leva para percorrer a distância de A até B [s]
t_{ba}	Tempo que o ultra-som leva para percorrer a distância de B até A [s]
T	Temperatura [ºC]

U	Tensão [V]
V	Velocidade média [m/s]
V_1	Velocidade média a montante [m/s]
V_2	Velocidade média a jusante [m/s]
$\vec{v}_r$	Velocidade relativa [m/s]
Z_1	Nível [m]
Z_2	Nível [m]
Δp, Dp	Pressão diferencial [Pa, Kgf/ m^2, mmca a 4ºC]
$\vec{\varpi}$	Velocidade angular [radianos/s]
ρ	Massa específica [kg/m^3]
γ	Peso específico [kgf/m^3]
θ	Ângulo de reflexão [radianos]
θt	Ângulo de torção [radianos]

Números Adimensionais

A'	Termo da tomada de pressão
β	Relação de áreas
C	Coeficiente de descarga
E	Coeficiente de velocidade de aproximação
It	Intensidade turbulenta
kp	Constante de proporcionalidade
k	Relação dos calores específicos
K	Coeficiente de Vazão
K_{UF}	Função do perfil de velocidades
Re	Número de Reynolds
Re_D	Número de Reynolds do Tubo
St	Número de Strouhal
ε	Coeficiente de expansão isentrópico

Operadores Matemáticos

∂	Derivada
σ	Desvio padrão
δ	Incerteza
$\int$	Integração
$\sum$	Somatório

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Medição de vazão: Um breve histórico	1
1.2	Classificação e descrição de medidores de vazão	3
1.3	Objetivo e escopo	4
1.4	Organização do trabalho	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	Utilização de orifícios em vazão	6
3	ORIFÍCIO INTEGRAL	16
3.1	Abordagem geral	16
3.2	Princípio de funcionamento	18
3.2.1	Equações da continuidade e de Bernoulli	18
3.2.2	Coeficiente de descarga	20
3.2.3	Equação usual em medição vazão com orifícios	24
4	MATERIAL E MÉTODOS	29
4.1	Descrição da instalação e procedimento experimental	29
4.2	Instrumentos utilizados	40
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1	Histerese	44
5.2	Vazão versus pressão diferencial	45
5.3	Curvas do coeficiente de descarga versus número de Reynolds	46
5.4	Curvas de ajuste	47
5.5	Equações obtidas	48
5.5.1	Equação da vazão pela pressão diferencial	48
5.5.2	Equação do coeficiente de descarga pelo número de Reynolds	50
5.5.3	Equações de ajuste	51
5.5.4	Equações unificadas	54
5.6	Generalização dos resultados	56
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	64
6.1	Conclusões	64
6.1	Recomendações para futuros trabalhos	66
REFERÊNCIAS		68
APÊNDICE A - GRUPOS DE MEDIDORES		71
A.1	Deprimogênios	71
A.1.1	Placas de orifício	72
A.1.2	Bocais de Vazão	73
A.1.3	Venturis	74
A.1.4	Aerofólios	75

A.1.5 Tubo Pitot 75
A.1.6 Tubo pitot multifuros 77
A.2 Lineares 78
A.2.1 Área variável 78
A.2.2 Medidores de efeito Coriolis 79
A.2.3 Eletromagnéticos 81
A.2.4 Térmicos 82
A.2.5 Turbinas 82
A.2.6 Ultra-sônicos 84
A.2.7 Vórtices 86
A.2.8 Especiais 87
A.3 Volumétricos 87
A.4 Medidores de canais abertos 87

APÊNDICE B - ANÁLISES DE INCERTEZAS 89
B.1 Introdução 89
B.2 Análise de incerteza por amostragem simples 89
B.2.2 Principais erros 89
B.2.3 Fundamentos matemático 90
B.3 Análise de incerteza das variáveis de interesse 93
B.3.1 Diâmetros 93
B.3.2 Pressão diferencial 94
B.3.3 Temperatura 98
B.3.4 Viscosidade absoluta e densidade da água 99
B.3.5 Massa 100
B.3.6 Tempo 101
B.3.7 Vazão real ou experimental 102
B.3.8 Vazão teórica 103
B.3.9 Número de Reynolds 107
B.3.10 Coeficiente de descarga 108

APÊNDICE C - NÚMERO DE REYNOLDS 110

APÊNDICE D - RESULTADO COMPLETOS 112

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 Medição de vazão: Um breve histórico

Muitos dos métodos de medição de vazão empregados nos dias atuais tiveram seu desenvolvimento forjado há muito tempo atrás. A exemplo do que se observa na maioria dos trabalhos encontrados na literatura, a presente dissertação também se inicia com uma breve abordagem histórica sobre o tema, segundo Martins (1998) e Delmée (2003).

A necessidade de medir vazão ganhou importância depois da canalização da água para o consumo doméstico. Já naquela época (30-103 d.C.), a administração pública encontrou na taxação do consumo deste líquido indispensável à vida uma excelente fonte de arrecadação.

As primeiras medições da vazão de água teriam sido executadas por egípcios e romanos. No entanto, o assunto começou a ser estudado de maneira mais sistemática no início do século XV, por Leonardo da Vinci, como mostra o trabalho de sua autoria intitulado "Sobre o Movimento da Água e das Águas Pluviais". Observando o movimento da água em um rio, da Vinci percebeu que a quantidade de água por unidade de tempo que atravessava qualquer seção compreendida entre as duas margens do curso d'água era constante, independentemente de sua largura, profundidade ou inclinação.

No início do século XVII, Galileu Galilei, um dos criadores do método experimental, contribuiu para que os fundamentos da medição de vazão fossem definidos. Seu discípulo, Evangelista Torricelli, estabeleceu a equação do escoamento livre da água através de orifícios.

No século XVIII, dois físicos, Daniel Bernoulli e Leonardo Euler, contribuíram de forma definitiva paras instituir as bases da mecânica dos fluidos, estabelecendo, respectivamente, a lei sobre o movimento dos líquidos, equação de Bernoulli de 1738, e as equações diferenciais gerais relativas ao movimento dos líquidos perfeitos. Neste mesmo século, foi apresentado, por Henri Pitot, um instrumento capaz de medir a velocidade da água, que passou a ser chamado de tubo de Pitot. Ainda no final deste século foram publicados os resultados de um outro trabalho que culminaram no que hoje denomina-se tubo de Venturi.

No século XIX, contribuições significativas foram feitas para a evolução da medição de vazão, dentre elas, tem-se o trabalho sobre o escoamento em tubos de pequeno diâmetro e viscosidade dos fluidos do físico Jean Poiseuille, os trabalhos sobre hidrodinâmica de Geoge Stokes e sobre o número de Reynolds de Osborne Reynolds.

No século XX, com a demanda dos processos industriais, novas tecnologias foram adicionadas aos princípios já conhecidos e novos medidores foram criados. Entre eles pode-se citar o vortex, baseado nos estudos de Theodor von Kármán, o medidor eletromagnético, baseados nas leis de Michael Faraday, o medidor mássico Coriolis, baseado na força de Coriolis. Ainda neste século, foi marcante a participação das universidades e institutos de pesquisa, para o desenvolvimento dos instrumentos e normas, além da divulgação dos estudos em congressos como parte fundamental do processo evolutivo.

Em medição de vazão existem normas de abrangência, as quais definem os parâmetros de cálculos para a calibração de instrumentos de medição de pressão diferencial, ou seja, os elementos secundários da medição de vazão. Estes parâmetros estão relacionados aos elementos deprimogênios de vazão, ou seja, placas de orifícios, que são conhecidas como elementos primários de vazão, garantindo assim uma precisão à medição de vazão (Delmée, 2003). No entanto, estas normas têm limites de aplicação (ISO-5167-2003, item 5.3.1), referentes aos limites dos diâmetros da tubulação, ao diâmetro mínimo do orifício, ao limite do número de Reynolds e restrições a rugosidade do tubo e para solucionar o problema, alternativas têm sido feitas pela indústria (Smar, Foxboro, ABB, Rosemount, etc) no intuito de garantir a medição de vazão em condições de operação que extrapolam estes limites. Dentro deste contexto, um item que merece mais investigações são os orifícios integrais, que atendem casos de diâmetros de tubulações industriais abaixo de 50 mm (2 polegadas).

Os orifícios integrais foram basicamente desenvolvidos pela indústria e a literatura relacionada ao instrumento é muito escassa e restrita. As referências mais abrangentes informam que o coeficiente de vazão é afetado pela rugosidade do tubo, pela excentricidade e pela forma da borda da placa (Miller, 1996).

1.2 Classificação e descrição de medidores de vazão

Uma forma muito comum de se classificar os medidores é de acordo com os princípios de funcionamento. De acordo com os princípios de funcionamento, podem-se classificar os medidores em quatro grupos distintos: deprimogênios, lineares, volumétricos e de canais abertos, conforme Tabela 1.1.

Tabela 1.1: Grupos de medidores.

Grupos	Medidores
1. Deprimogênios:	Placas de Orifício Bocais de Vazão Venturis Aerofólios Tubo Pitot Tubo Pitot Multifuros
2. Lineares:	Área Variável Efeito Coriolis Eletromagnéticos Térmicos Turbinas Ultra-sônicos Vórtices Especiais
3. Volumétricos:	Diafragma Disco de Nutação Palhetas Pistão Oscilante Pistões Recíprocos Rotor Semi-Imersão
4. Medidores de Canais Abertos:	Vertedouros Calha Parshall

A descrição detalhada dos quatro grupos acima citados encontra-se no Apêndice A. Este trabalho tem como foco o orifício integral, que é um tipo de placa de orifício para utilização em tubulações de ½, 1 e 1 ½ polegadas, agregado ao transmissor de pressão, sendo o mesmo abordado no Capítulo 3.

1.3 Objetivo e escopo

No presente trabalho foi utilizado o orifício integral que é um conjunto formado por um corpo de adaptação entre a placa de orifício e o transmissor de pressão, garantindo a montagem alinhada com os tubos e união ao transmissor de pressão, conforme Figura 1.1.


(a)

(b)

Figura 1.1: Corpo orifício integral e placa de orifício (a), Conjunto orifício integral e transmissor de pressão diferencial (b).

Este trabalho foi conduzido com a finalidade de quantificar e qualificar as interferências que as particularidades associadas aos orifícios integrais (rugosidade do tubo, excentricidade da placa e forma da borda) podem causar no coeficiente de vazão e, assim, determinar sua influência no desenvolvimento do produto.

Para a determinação das interferências acima foram realizados experimentos em regime permanente, coletando e avaliando os dados referentes a 30 corridas experimentais, variando a rugosidade dos tubos (tubo liso e rugoso), a excentricidade da placa (uma concêntrica e duas excêntricas) e a forma da placa de orifícios (formas definidas pelas combinações entre 3 diâmetros do orifício a três tipos de bordas (canto vivo, cônica e ¼ de círculo). Além das corridas citadas acima foram feitas mais 3 corridas adicionais com o objetivo de investigar interferências dimensionais de fabricação.

Nos tubos utilizados no aparato experimental foi investigada a intensidade turbulenta causada pelo escoamento do fluido, com auxílio de um anemômetro de fio quente.

Simulações numéricas, visualizações de escoamento e regimes transientes não fazem parte do escopo deste trabalho.

1.4 Organização do trabalho

O trabalho foi dividido em seis capítulos e quatro apêndices, conforme apresentado no sumário.

No Capítulo 1, são apresentados, entre outras coisas, a motivação e os objetivos do trabalho.

O Capítulo 2 contém uma revisão bibliográfica, abordando trabalhos realizados com orifícios e placas de orifício, evidenciando que este procedimento é aplicado há muito tempo como medidor de vazão e orifício de restrição.

No Capítulo 3, é apresentado o orifício integral, abordando sua forma construtiva, seu princípio de funcionamento e algumas considerações de fabricantes.

O Capítulo 4 contém a descrição do aparato, dos procedimentos experimentais e dos equipamentos utilizados.

No Capítulo 5, os resultados obtidos experimentalmente são apresentados e discutidos.

O Capítulo 6 reúne, de forma ordenada, as principais conclusões obtidas e aponta recomendações para trabalhos futuros.

Nos Apêndices A, B, C e D, são apresentados, respectivamente, a descrição dos grupos dos medidores de vazão, a análise de incertezas experimentais, o número de Reynolds e o conjunto de todas as curvas obtidas, que não foram incluídas no texto principal para não torná-lo excessivamente enfadonho.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Utilização de orifícios em vazão

Wildhack (1954) faz uma revisão de alguns métodos de medição de vazão. Os principais equipamentos revistos foram: rotâmetros, bocais de vazão, medidores acústicos, medidores magnéticos e medidores mássicos de vários tipos. No entanto, nenhuma informação sobre placas de orifício e orifícios integrais é encontrada neste estudo.

Apesar dos ensaios experimentais com orifícios em vazão serem pouco documentados na literatura pertinente, um dos primeiros ensaios divulgados data da década de 30 do século passado, com Page (1935), que desenvolveu um conjunto de orifícios com fluxo constante para uso em laboratório e estudou as características desses orifícios. Os orifícios do experimento foram fabricados de acordo com a Figura 2.1, onde todas as rebarbas foram removidas e inspecionadas microscopicamente. Este método não permitia duplicações precisas dos orifícios, mas era facilmente realizado por um mecânico amador. Segundo o autor, na época havia poucos dados na literatura sobre pequenos orifícios de qualquer operação em pressão diferencial crítica.

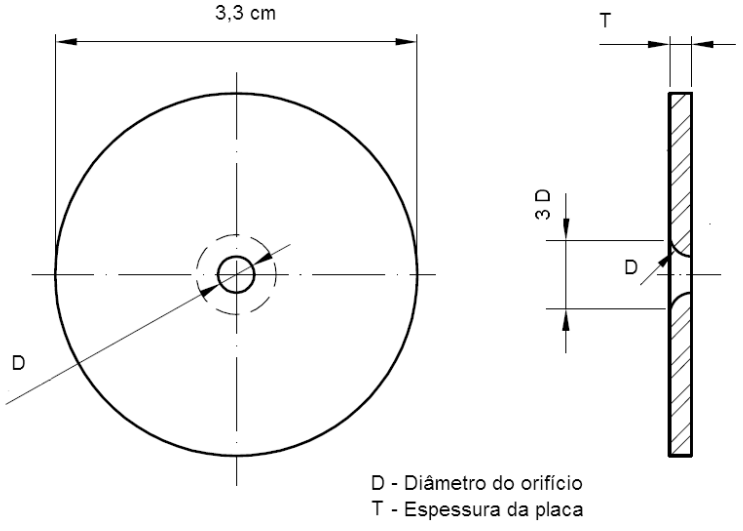


Figura 2.1: Projeto do orifício (adaptada de Page, 1935).

Na época, o método de fabricação empregado permitiu uma previsão aproximada da área do orifício acabado, mas a área verdadeira utilizada no cálculo foi mensurada por meio de um microscópio. Na Tabela 2.1 os números dos orifícios denotam a broca utilizada para fazer o furo e suas respectivas áreas teóricas e medidas, além da espessura do orifício. O aparato utilizado para calibração do medidor de orifícios é mostrado na Figura 2.2

Tabela 2.1: Diâmetros dos orifícios.

Número do orifício	Área teórica da broca usada cm^2	Área medida cm^2	Diâmetro do Orifício cm	Espessura da placa (T) cm
40	0.04865	0,05171	0,2568	0,310
40a	0.04865	0,04997	0,2522	0,277
42	0.04381	0,04672	0,2438	0,310
44	0.03748	0,03949	0,2243	0,310
46a	0.03323	0,03581	0,2136	0,239
46	0.03325	0,03488	0,2108	0,310
48b	0.02929	0,03125	0,1994	0,246
48a	0.02929	0,03125	0,1966	0,312
48	0.02929	0,03039	0,1963	0,310
50a	0,02484	0,02541	0,1798	0,310
50	0,02484	0,02530	0,1796	0,310
52	0,02013	0,02136	0,1649	0,310
52a	0,02013	0,02029	0,1608	0,289
54a	0,01536	0,01616	0,1435	0,310
54	0,01536	0,01562	0,1410	0,320
56	0,01071	0,01143	0,1207	0,320
60	0,00813	0,01014	0,1135	0,310
58	0,00897	0,00928	0,1087	0,310

Fonte: adaptada de Page (1935).

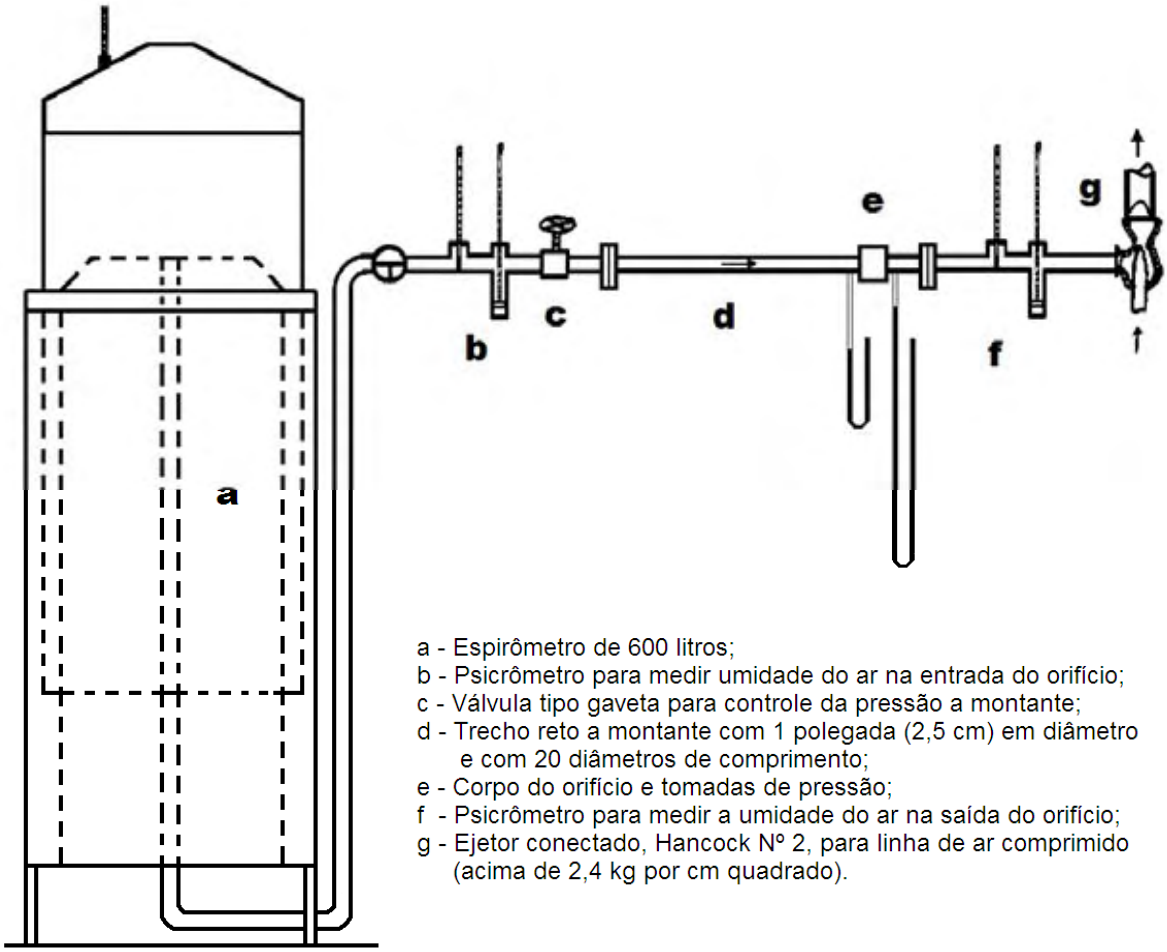


Figura 2.2: Aparato para calibração dos medidores de orifício (adaptado de Page, 1935).

As medições da descarga de ar foram convertidas para o volume equivalente a 1 atmosfera (76 cm de mercúrio) e 21,11 ºC. Este volume corrigido dividido pelo tempo resultou a vazão em litros por minuto (Figura 2.3).

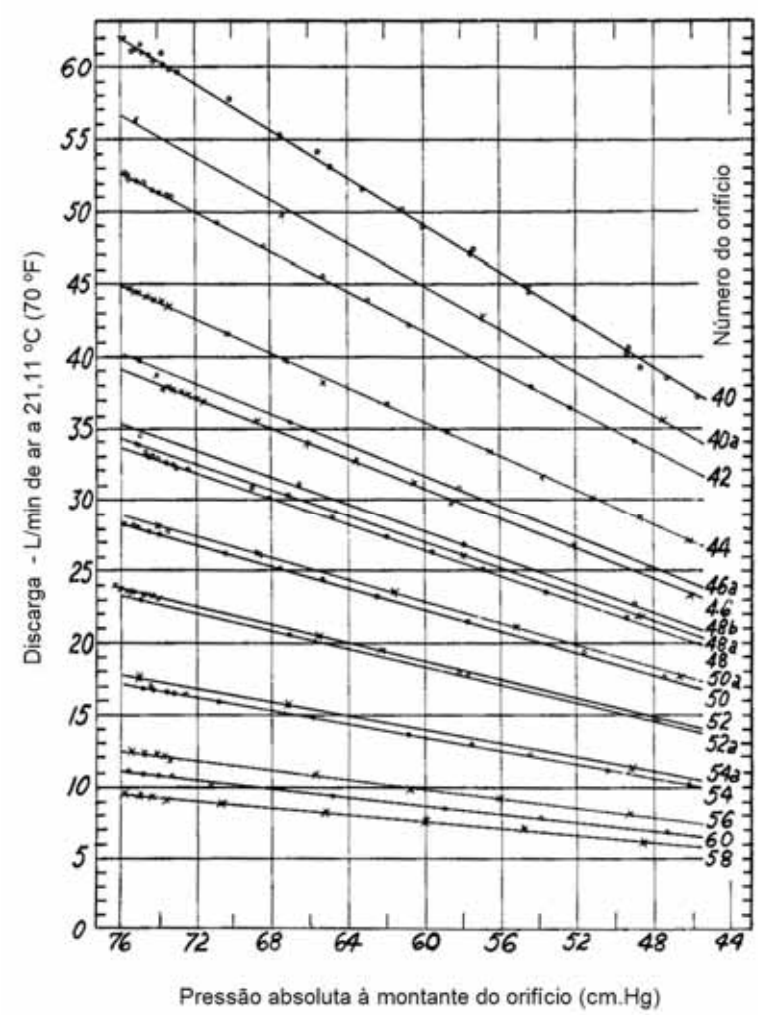


Figura 2.3: Descarga de ar através dos orifícios a 21,11 ºC e 85% de umidade relativa (adaptada de Page, 1935).

Os coeficientes de descarga foram calculados e plotados, de acordo com a curva típica representada pela Figura 2.4.

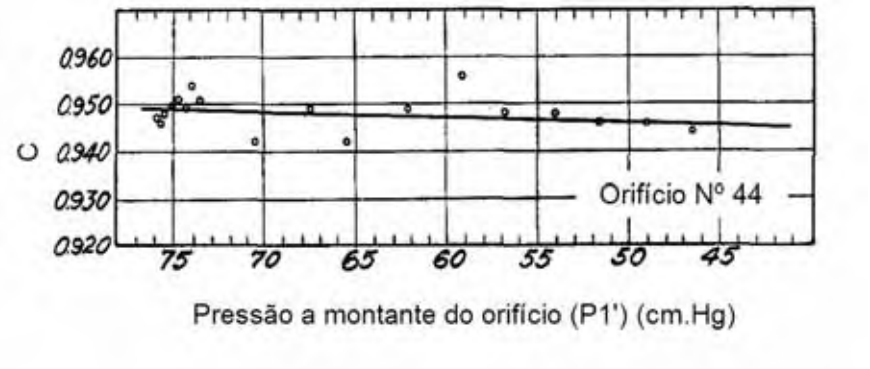


Figura 2.4: Coeficiente de descarga para orifício número 44 (adaptada de Page, 1935).

Os valores de *C* foram calculados para cada orifício das pressões de 50,8; 63,5 e 76,2 cm de mercúrio e plotados em função da área *A*, conforme Figura 2.5.

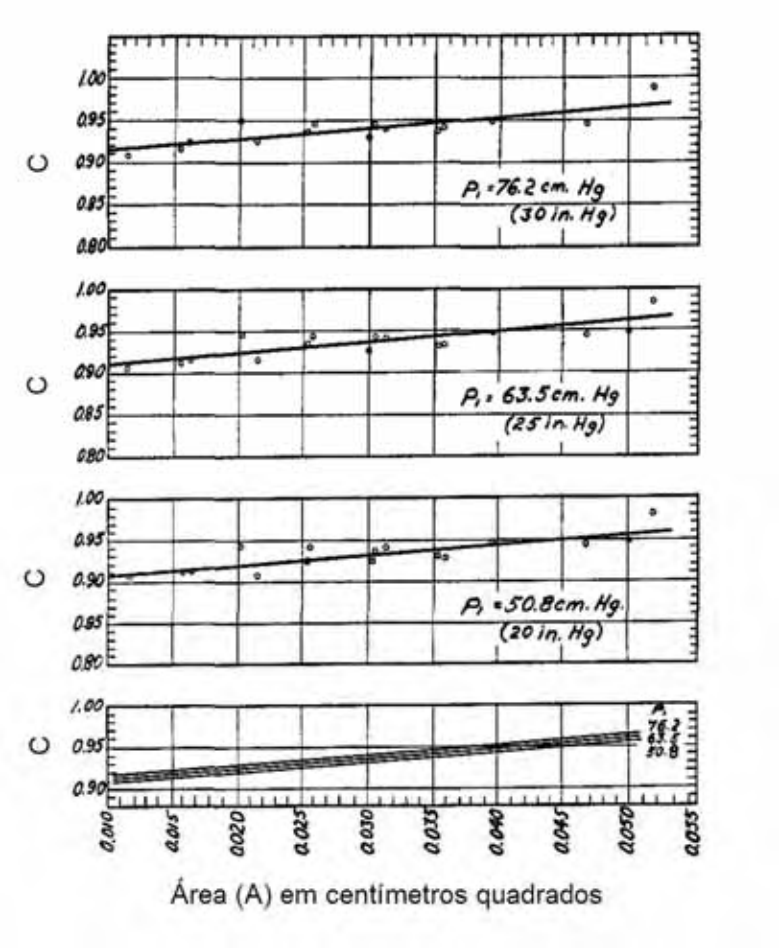


Figura 2.5: Variação do coeficiente de descarga com as respectivas áreas a diferentes pressões P_1 (adaptada de Page, 1935).

A seguir são apresentadas as equações para o coeficiente de descarga *C*, calculados dos dados experimentais com as respectivas áreas dos orifícios em cm^2 e as pressões a montante P_1, indicadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Equação do coeficiente de descarga *C*.

P_1		Equação para *C*
cmHg	(Polegadas de Hg)	
50,8	(20)	C = 0,897 – 48,12A
63,5	(25)	C = 0,899 – 50,83A
76,2	(30)	C = 0,904 – 49,15A

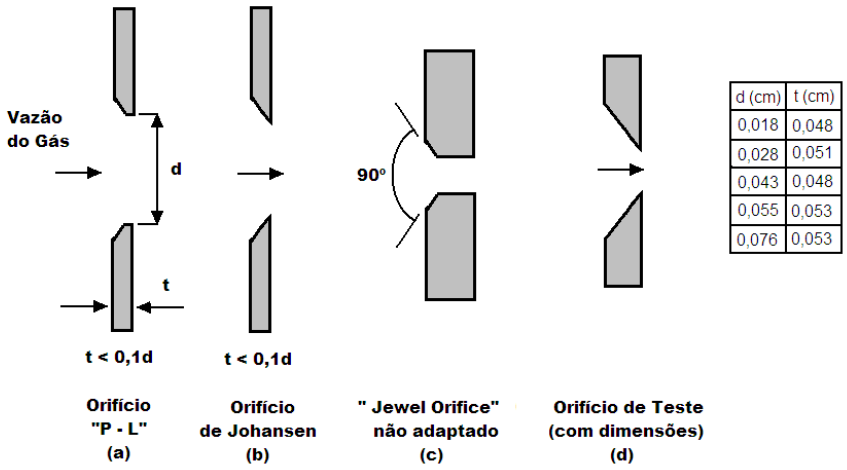
Fonte: adaptada de Page (1935).

Ao final do estudo, Page (1935) concluiu que pequenos orifícios circulares, para terem fluxos constantes de gás sob pressão diferencial críticas à vazão constante para qualquer pressão dada à montante, pode ser calculado com um erro provável de cerca de ± 1% para um orifício através da medida da área, mas que para uma determinação mais precisa de taxa de fluxo, o orifício deveria ser calibrado com um padrão.

Reed e Sprange (1968) desenvolveram um experimento para vazão de gases em faixas de 1 a 500 litros por hora, usando um medidor de vazão de pressão diferencial com orifício de entrada cônica, em substituição aos “Jowel orifices”, para prever as faixas de vazão de um gás ou outra mistura gasosa com o qual o medidor foi calibrado.

Além da substituição do elemento primário, o procedimento utilizado pelos autores envolveu, basicamente, uma correção de densidade necessária no cálculo da curva de calibração da mistura gasosa.

Na Figura 2.6 é apresentada a geometria do orifício de entrada cônica utilizado no experimento de Reed e Sprange (1968).



d (cm)	t (cm)
0,018	0,048
0,028	0,051
0,043	0,048
0,055	0,053
0,076	0,053

Figura 2.6: Geometria dos orifícios (adaptada de Reed e Sprange, 1968).

Os resultados obtidos para todos os tamanhos de orifícios mostraram um padrão consistente. Para um dado tamanho de orifício o coeficiente de descarga, assim como o número de Reynolds, aumenta para cerca de 250. O aumento adicional do número de Reynolds, e consequentemente da relação de pressão, conduz a uma queda gradual do coeficiente de descarga. A diminuição do coeficiente de descarga quando a relação de pressão foi aumentada ocorreu pelos efeitos da compressibilidade, o que já era esperado. Assim, para tornar comparáveis os resultados para vários gases, os dados obtidos para cada orifício foram

representados como coeficiente de descarga em função da raiz quadrada da razão de pressão diferencial através do orifício, conforme ilustrado na Figura 2.7.

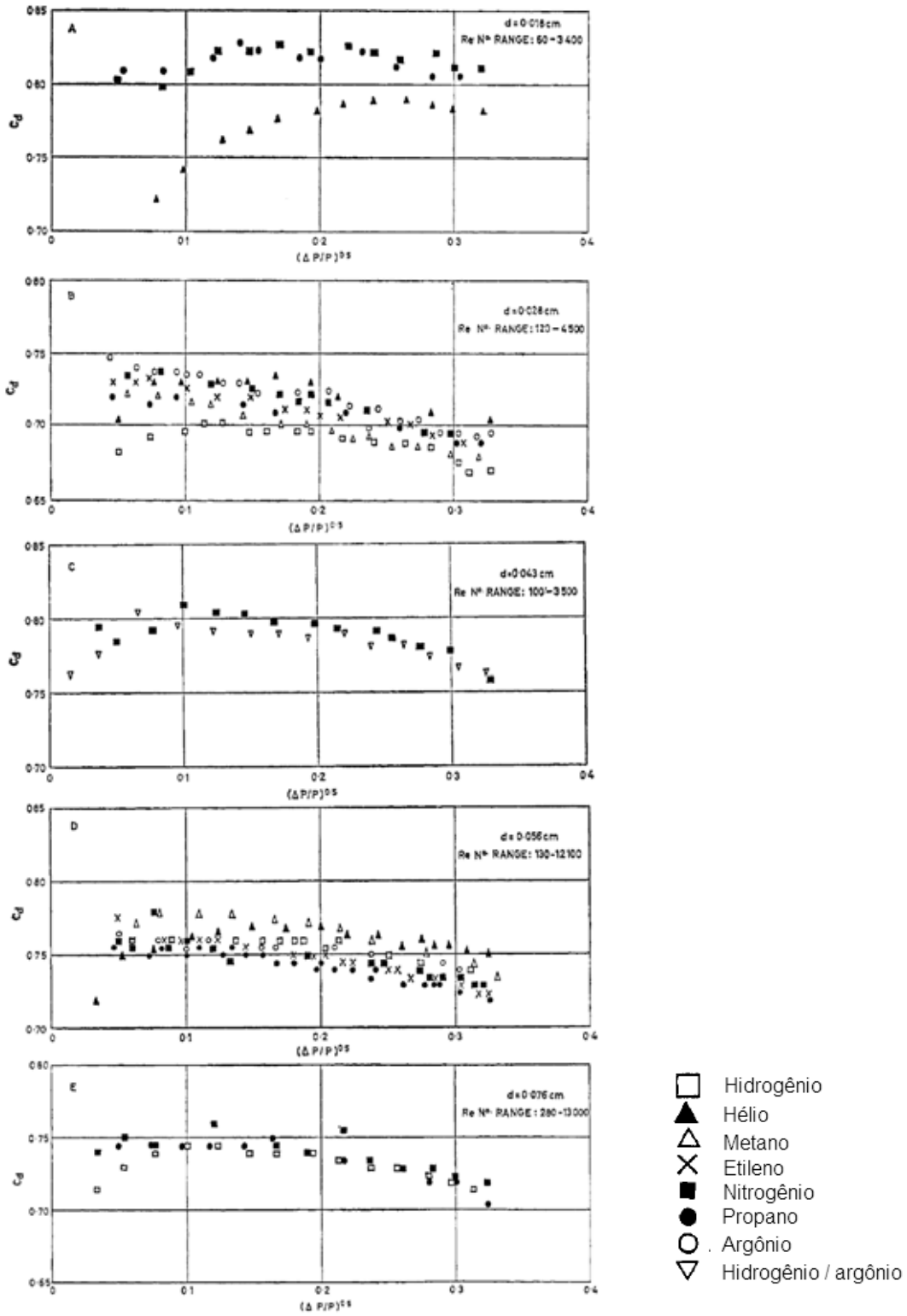


Figura 2.7: Coeficiente de descarga *versus* a raiz quadrada da relação de pressão diferencial pela pressão (adaptada Reed e Sprange, 1968).

Reed e Sprange (1968) relatam que esse procedimento simples pode ser utilizado

para predizer a vazão de um gás ou uma mistura de gases em detrimento daquele com que um orifício foi originalmente calibrado. A vazão do gás substituído, (Q'), em um determinado valor de relação de pressão através do orifício, pode ser calculada pela Equação 2.1 a partir da vazão na mesma proporção de pressão do gás utilizado para fins de calibração.

$$Q' = Q \cdot \sqrt{\frac{\rho(T,P)}{\rho'(T',P')}} \tag{2.1}$$

Onde: $\rho(T, P)$ e $\rho'(T', P')$ são, respectivamente, a densidade da massa do gás utilizado para a calibração e do gás substituído na temperatura e a pressão imediatamente a montante do orifício.

A Equação 2.1 é válida apenas para números de Reynolds superiores a 300. Para verificar que essa condição é satisfeita, um valor aproximado do valor da viscosidade de um gás ou da mistura de gases é necessário. Na época os autores indicaram as cartas de alinhamento de Brokaw (1961), para determinação da viscosidade de um gás ou mistura de gases.

Romero (2001) apresenta uma estimativa de incertezas na medição de fluxo mássico mediante uma placa de orifício concêntrica de canto vivo e tomadas no flange, baseado em documentos ISO 5167-1, manuais da ISO, ISO 5168 e “software” da ASME para as propriedades da água e do vapor. No exercício numérico proposto para o fluxo de vapor aquecido pode-se concluir que as contribuições devido à incerteza nos valores da viscosidade dinâmica do fluido, do coeficiente de expansão isentrópico e do coeficiente de expansão térmica do tubo são insignificantes. Em aplicações próximas a temperatura ambiente as fontes de incerteza de maior preponderância são: o coeficiente de descarga, o diferencial de pressão ao longo da placa de orifício, o coeficiente de expansão, a densidade do fluido, o diâmetro interno da placa de orifício e do diâmetro do tubo.

Belyaev, Patrikeev e Lichko (2001), comparando documentos ISO e normas para calcular a vazão e as quantidades de gases para dados de distribuição de gases na região de Moscou, mostraram ser mais adequado introduzir alterações na norma MI 2588-2000. Essas alterações do TC 30 (ISO – Technical committes – TC 30 – Measuremente of fluid flow in closed conduits) foram aceitas pela maioria dos países. Estas alterações incluem duas características na variável pressão diferencial de medidores de vazão com placas de orifício: o coeficiente de descarga (C) e o coeficiente de expanção isoentrópico (ε).

Para a equação do coeficiente de descarga foi adotada a equação 2.2 de Reade-Haris-Gallacher (RHG), que foi proposta em 1992 e é utilizada nas recomendações da American Gas Association (AGA):

$$C = \left(\begin{array}{l} 0{,}5961 + 0{,}0261 \cdot \beta^2 - 0{,}216 \cdot \beta^8 + 0{,}00521 \cdot \left(10^6 \cdot \beta \cdot \mathrm{Re}\right)^{0{,}7} + \\ \quad (0{,}0188 + 0{,}0063 \cdot A) \cdot \beta^{3.5} \cdot \left(10^6 / \mathrm{Re}\right)^{0{,}3} + \\ \quad \left(0{,}043 + 0{,}08 \cdot e^{-10 \cdot L1} - 0{,}123 \cdot e^{-7 \cdot L1}\right) \cdot (1 - 0{,}11 \cdot A) \cdot \beta^4 / (1 - \beta^4) - \\ \quad 0{,}03 \cdot \left(M_2^{'} - 0{,}8 \cdot M_2^{' \, 1{,}1}\right) \cdot \beta^{1{,}3} \end{array} \right) \qquad (2.2)$$

Para um diâmetro interno de tubo de medida D < 71,12 mm utiliza-se a Equação (2.3)

$$C' = C + 0{,}011(0{,}75 - \beta) \cdot [2{,}8 - (D/25{,}4) \qquad (2.3)$$

Nas Equações (2.2) e (2.3) o d é o diâmetro do orifício (mm), D é o diâmetro interno da tubulação (mm), $\beta = d/D$ é a relação dos diâmetros e Re é o número de Reynolds.

Os parâmetros M'_2 e A, são expressos em 2.4 e 2.5.

$$M_2^{'} = 2 \cdot L_2^{'}(1 - \beta) \qquad (2.4)$$

$$A = (19000 \cdot \beta / \mathrm{Re})^{0{,}8} \qquad (2.5)$$

Os valores de L_1 e L'_2 dependem dos locais de tomada da pressão diferencial, sendo que: para sistema angular $L_1 = L'_2 = 0$, sistema no flange $L_1 = L'_2 = 25{,}4/D$ e três graus de sensor $L_1 = 1$, $L'_2 = 0{,}47$.

O coeficiente de expansão isentrópico é definido pela seguinte equação:

$$\varepsilon = 1 - \left(0{,}351 + 0{,}256 \cdot \beta^4 + 0{,}93 \cdot \beta^8\right) \cdot \left\{1 - \left[(p - \Delta p) / p\right]^{(1/k)}\right\} \qquad (2.6)$$

Onde: Δp e p são a pressão diferencial através do orifício e a pressão absoluta no tubo, respectivamente, enquanto que k é a razão dos calores específicos.

Em estudo posterior, também com a finalidade de obter melhores parâmetros para quantificar a vazão e distribuição de gases, o que afeta o pagamento pelo fornecimento de gás natural, Belyaev, Patrikeev e Lichko (2003) compararam os resultados da vazão para o gás natural de acordo com as normas ISO/FDIS 5167-1/4-2002 e a GOST 8.563-97. Para ambas as normas foram comparados os valores de número de Reynolds, coeficiente de descarga, coeficiente de expansão e vazão volumétrica. A posição das tomadas de pressão diferencial foram obtidas em canto e no flange do equipamento. Foram consideradas as relações de

diâmetros (0,4; 0,5; 0,6; 0,7 e 0,75), as pressões diferenciais (5,0 10^4 Pa, com $\Delta p/p$ = 0,01; 2,5 10^5 Pa, com $\Delta p/p$ = 0,05; 7,5 10^5 Pa, com $\Delta p/p$ = 0,15 e 1,25 10^6 Pa, com $\Delta p/p$ = 0,25).

Depois de todos os dados tabulados foram calculados os incertezas relativos à vazão volumétrica, aos coeficientes de descarga e de expansão, através das Equações (2.7), (2.8) e (2.9), respectivamente:

$$\delta_{qs} = \{[(q_s)_{ISO}/(q_s)_{GOST}]-1\}\cdot 100 \quad (2.7)$$

$$\delta_{s} = \{[(C)_{ISO}/(C)_{GOST}]-1\}\cdot 100 \quad (2.8)$$

$$\delta_{\varepsilon} = \{[(\varepsilon)_{ISO}/(\varepsilon)_{GOST}]-1\}\cdot 100 \quad (2.9)$$

Nesta comparação entre as normas, Belyaev, Patrikeev e Lichko (2003) concluíram que a medição de fluxo fornece o valor da vazão volumétrica em condições normais (*qs*) e do limite do erro absoluto das medições (± Δ*qs*), ou seja, o erro relativo de medições de fluxo é numericamente igual ao erro relativo de determinação do coeficiente de descarga. Então, pela norma ISO/FDIS 5167-1/4-2002 (Seção 5.3.3), a incerteza da vazão (δ*qs* = ± 0,5%) para um diâmetro relativo (β) de não mais do que 0,6. Por outro lado, pela norma GOST 8.563-97, a incerteza é de ± 0,6%. Os autores atribuiram a diferença entre os resultados de medições a um erro de procedimento da norma GOST 8.563-97 e destacaram a necessidade de refazer o padrão deste procedimento da norma a fim de harmonizá-la com a norma ISO/FDIS 5167-1/4-2002, permitindo que as medições de fluxo de gás sejam mais precisas e os pagamentos padronizados.

Os estudos de Belyaev, Patrikeev e Lichko (2001 e 2003) deixam claro que a aplicação de diferentes normas podem incorrer em maiores ou menores desvios, influenciando nos cálculos da vazão de fluídos.

De forma geral, as medições de vazão com orifícios decorrem da utilização de diferentes normatizações, o que pode gerar divergências mensuráveis e de difícil comparação.

Através de uma ampla consulta a bases de dados, observou-se haver grande escassez de literatura específica sobre orifícios integrais. Dentro deste contexto, este trabalho apresenta os resultados obtidos em uma vasta campanha experimental envolvendo este tipo de medidor de vazão, preenchendo, assim, parte da lacuna existente.

Capítulo 3

ORIFÍCIO INTEGRAL

3.1 Abordagem geral

De acordo com Miller (1996), quando o diâmetro do tubo é 1½ polegada (38.1 mm) ou menor e o fluido é limpo, é comum selecionar um orifício instalado integralmente com um transmissor de pressão diferencial (Figura 3.1). Isto resulta em uma instalação compacta que determina numa precisão global, normalmente de ± 2 a 5 % não calibrado, predeterminada e baseada na calibração da vazão reprodutível de orifícios de tamanhos fixos. Em linhas de pequenos diâmetros de ½ a 1½ polegadas (12.7 a 38.1 mm), o efeito da rugosidade do tubo, a excentricidade da placa e forma da borda, resultam em coeficientes imprevisíveis. Todas as indicações são de que os coeficientes devem ser experimentalmente determinados, com seleção de uma borda em canto vivo ou quadrante dependendo do número de Reynolds.



Figura 3.1: Orifício integral e transmissor de pressão diferencial.

A forma construtiva mostrada na Figura 3.1 é uma das mais comuns, onde as tomadas de pressão diferencial estão dispostas em “corner taps” (tomadas em canto), conforme Figuras 3.2 e 3.3.

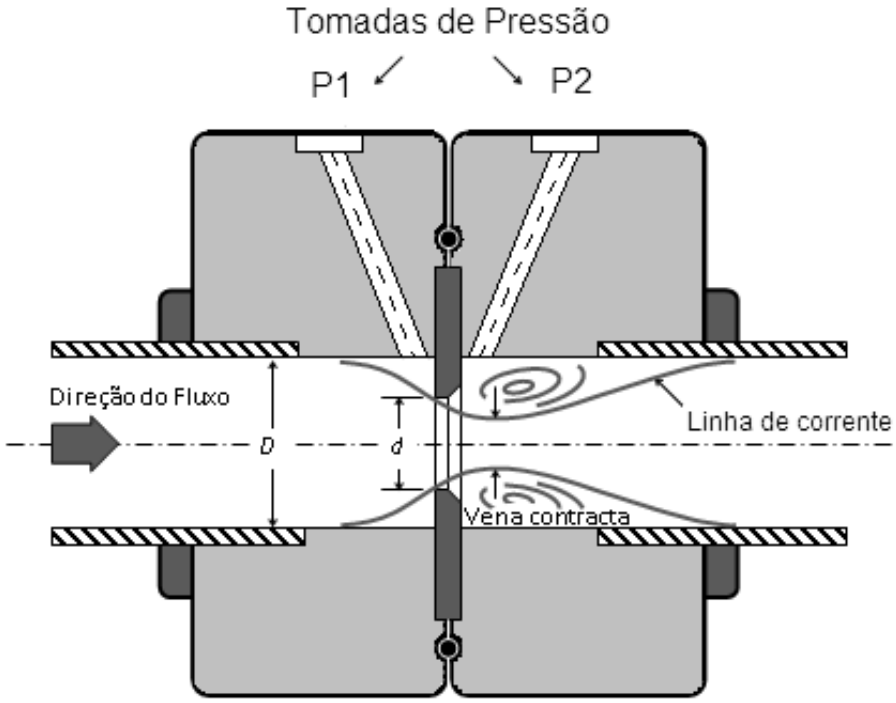


Figura 3.2: Orifício integral (corte longitudinal).

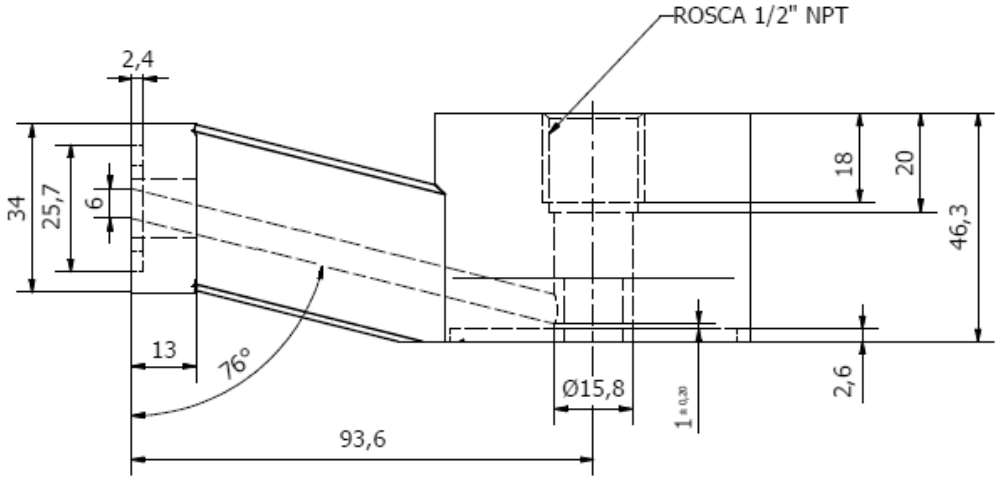


Figura 3.3: Orifício integral (corte do modelo utilizado no experimento).

Além do modelo mostrado na Figura 3.1, também chamado de modelo tipo in-line Taylor (ABB-Kent Taylor) para tubulações de ½, 1 e 1½ polegadas, existem os modelos da

Foxboro “in-line” e “u-bend”, no entanto, estes modelos só existem para tubulações de ½ polegada, conforme Figura 3.4.

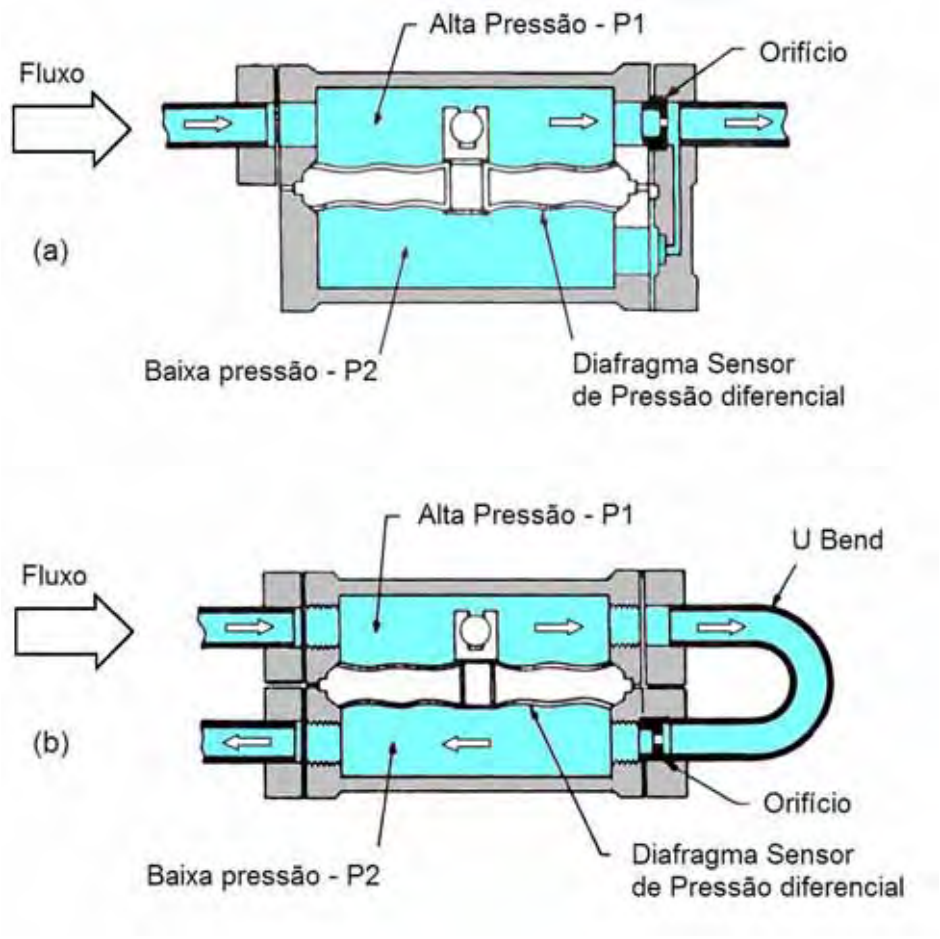


Figura 3.4: Orifício integral Foxboro, (a) in-line e (b) u-bend (adaptada de Miller, 1996).

3.2 Princípio de funcionamento

Segundo Delmée (2003), o princípio para todos medidores de vazão por pressão diferencial é baseado na equação de Bernoulli e a equação da continuidade, complementado por coeficientes práticos para que a vazão possa ser medida com precisão.

3.2.1 Equações da continuidade e de Bernoulli

Aplicando a equação da continuidade em escoamentos incompressíveis que fluem em tubulação completamente preenchida, cuja secção varia de S_1 para S_2. Num determinado instante a vazão volumétrica é igual à velocidade pela área da seção da tubulação considerando o escoamento incompressível, Figura 3.5.

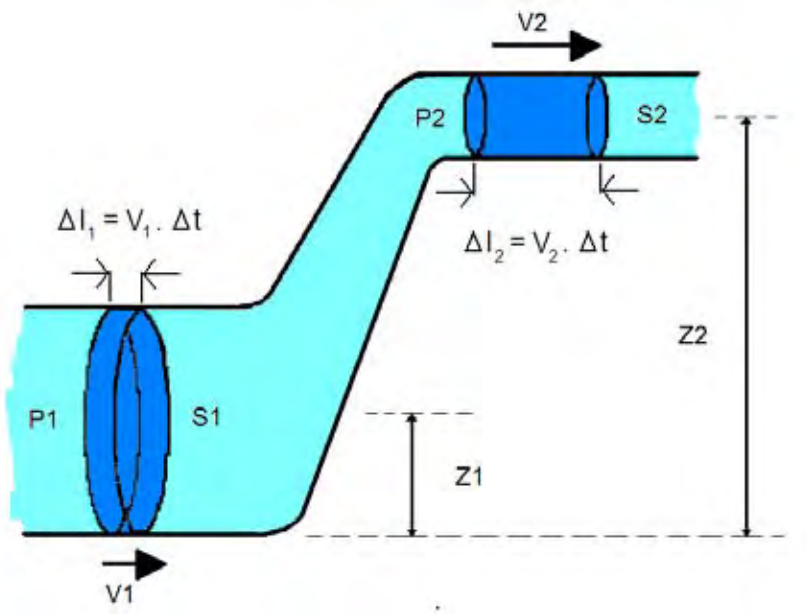


Figura 3.5: Secção tubular.

Logo, tem-se:

$$Q_1 = Q_2 \tag{3.1}$$

$$V_1 \cdot S_1 = V_2 \cdot S_2 \tag{3.2}$$

Segundo Fox e McDonald (1998), a equação de Bernoulli pode ser obtida da integração da equação de Euler ao longo de uma linha de corrente. Esta é dada por:

$$-\left(\frac{1}{\rho}\cdot\frac{\partial P}{\partial s}\right)-\left(g\cdot\frac{\partial z}{\partial s}\right)=\left(V\cdot\frac{\partial v}{\partial s}\right) \tag{3.3}$$

Se uma partícula fluida mover-se de uma distância, ds, ao longo de uma linha de corrente, então:

$$\frac{\partial P}{\partial s}\cdot ds = dP \quad \text{(a variação de pressão ao longo de } s\text{)}$$

$$\frac{\partial z}{\partial s}\cdot ds = dz \quad \text{(a variação de elevação ao longo de } s\text{)}$$

$$\frac{\partial V}{\partial s}\cdot ds = dV \quad \text{(a variação de velocidade ao longo de } s\text{)}$$

Logo, após multiplicar a Equação (3.3) por *ds*, tem-se a Equação (3.4), ao longo de *s*.

$$-\frac{dp}{\rho} - g\cdot dz = V\cdot dV \tag{3.4}$$

Ou, então:

$$\frac{dP}{\rho}+V\cdot dV+g\cdot dz=0 \tag{3.5}$$

A integração ao longo de *s* da Equação (3.5), resulta:

$$\int\left(\frac{dP}{\rho}+V\cdot dV+g\cdot dz\right)=0 \tag{3.6}$$

$$\frac{P}{\rho}+\frac{V^2}{2}+g\cdot z=\text{Constante} \tag{3.7}$$

No entanto, para aplicar a equação de Bernoulli, deve-se especificar a relação entre a pressão (*P*) e a massa especifica (*ρ)*. Para o caso especial de escoamento incompressível, ρ = constante.

Portanto, a Equação (3.7) deve obedecer as seguintes restrições:

- Escoamento em regime permanente;
- Escoamento incompressível;
- Escoamento sem atrito;
- Escoamento ao longo de uma linha de corrente.

Ainda se dividir a Equação (3.7) por *g*, tem-se:

$$\frac{P}{\gamma}+\frac{V^2}{2\cdot g}+z=\text{Constante} \tag{3.8}$$

Segundo Fox e McDonald (1998) e Streeter e Wylie (1980), a equação de Bernoulli ainda pode ser deduzida da primeira lei da termodinâmica, embora exigindo restrições diferentes.

3.2.2 Coeficiente de descarga

A fim de permitir o uso prático da equação de Bernoulli é necessária a introdução do coeficiente de descarga (*C)*, pois para escoamentos reais, a velocidade não é igual à velocidade média em todos os pontos e as linhas fluidas não acompanham o formato geométrico da tubulação, especialmente em placas de orifício e orifícios (Delmée, 2003). Na Figura 3.6 é mostrada a faixa de aplicação para alguns elementos deprimogênios.

O coeficiente de descarga (*C*) pode ser escrito como:

$$C = \frac{Qreal}{Qteórico} \tag{3.9}$$

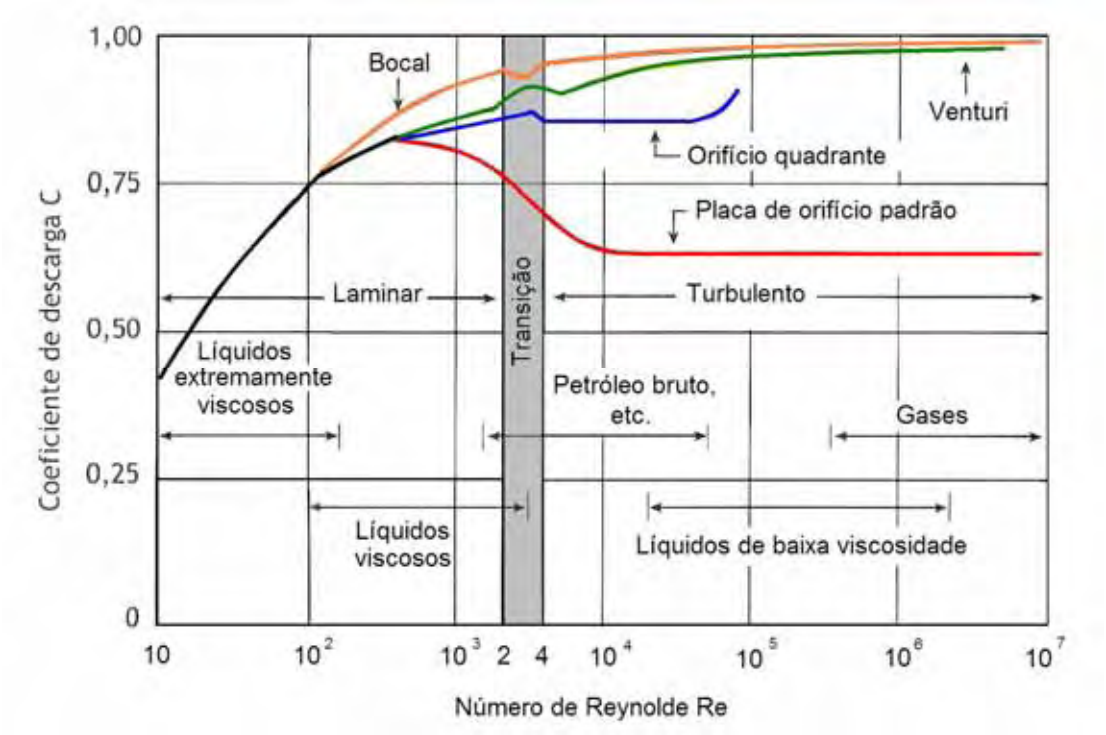


Figura 3.6: Aplicação de alguns elementos deprimogênios em função do número de Reynolds (adaptada de Delmée, 2003).

A vazão teórica (*Qteórica)* é obtida a partir de medidas precisas das dimensões do elemento de massa específica do fluido e a pressão diferencial, ou seja, utilizando se a equação de Bernoulli com as restrições citadas acima. Enquanto que a vazão real (*Qreal)* é obtida pelo tempo necessário para se preencher um determinado volume (recipiente volumétrico e cronômetro), ou completar um peso definido de líquido (balança e cronômetro). Esses levantamentos são realizados em centros de pesquisa e universidades de diversos países, e os valores são consolidados em comitês internacionais de normalização (Delmée, 2003).

No caso de orifícios integrais o coeficiente de descarga (*C*) pode vir combinado ao coeficiente de aproximação (*E*), devido à geometria fixa do medidor e ser expresso como coeficiente de vazão (*K*), sendo.

$$K = C \cdot E \tag{3.10}$$

O coeficiente de Aproximação (*E*), pode ser escrito como:

$$E = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}} \tag{3.11}$$

Logo, o coeficiente de vazão pode ser escrito como:

$$K = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \tag{3.12}$$

As áreas da secções 1 e 2, S_1 e S_2, respectivamente, podem ser escritas como:

$$S_1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \tag{3.13}$$

$$S_2 = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \tag{3.14}$$

Sendo que a relação das áreas β, pode ser escrita como:

$$\beta = \sqrt{\frac{S_2}{S_1}} = \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot d^2}{4}}{\frac{\pi \cdot D^2}{4}}} = \sqrt{\frac{d^2}{D^2}} = \frac{d}{D} \tag{3.15}$$

Para os orifícios integrais tem-se os coeficientes desenvolvidas pela Foxboro (Integral Flow Orifice Assembley), Rosemount 1195IO e a ABB-Kent Taylor, conforme Tabela 3.1 e Tabela 3.2. Uma forma comum para cálculo dos coeficientes de descarga para os orifícios integrais é através da Equação (3.16), usados pela Foxboro (Integral Flow Orifice Assembley) e Rosemount 1195IO:

$$C = C_\infty + \frac{b}{\mathrm{Re}_D{}^n} \tag{3.16}$$

onde: *b* e *n* são coeficientes empíricos (vide Tabela 3.1), *C* é o coeficiente de descarga e Re_D é o número de Reynolds baseado no diâmetro da tubulação, para o *C* que se quer determinar (adimensional). O coeficiente C_∞, por sua vez, é determinado identificando-se o valor assintótico para o qual a curva *C* x *Re* tende, quando o número de Reynolds atinge valores suficientemente elevados. Esta determinação pode ser feita graficamente, pela simples

extrapolação da curva do coeficiente de descarga. A título de ilustração, valores de C_∞ preconizados pelos fabricantes Foxboro e Rosemount são apresentados na Tabela 3.1, para diferentes geometrias de orifícios integrais.

Tabela 3.1: Parâmetros para cálculo do coeficiente de descarga preconizados pelos fabricantes Foxboro e Rosemount.

Orifício integral	Coeficiente de Descarga para número de Reynolds Infinito	Termo do número de Reynolds: Coeficiente b	Termo do número de Reynolds: Expoente n
Foxboro (IFOA)			
Borda quadrante, D = 1/2" (12,5 mm)	$1{,}1126 - 99{,}13.\beta^2 + 8006.\beta^4 - 26900.\beta^8$	$-10{,}72.\beta^{(1/2)} + 3823.\beta^{(5/2)} - 309{,}300.\beta^{(9/2)}$	0,5
Borda canto vivo, D = 1/2" (12,5 mm)	$0{,}6479 - 0{,}3505.\beta^2 + 0{,}3853.\beta^4 - 4{,}645.\beta^8$	$-0{,}4356.\beta^{(1/2)} + 33{,}49.\beta^{(5/2)} - 88{,}33.\beta^{(9/2)}$	0,5
Borda canto vivo, D = 1" (25,0 mm)	$0.6050 - 0{,}1837.\beta^2 + 0{,}6615.\beta^4 - 1{,}094.\beta^8$	$1{,}646.\beta^{(1/2)} + 2{,}394.\beta^{(5/2)} - 4{,}899.\beta^{(9/2)}$	0,5
Borda canto vivo, D = 1.1/2" (40 mm)	$0{,}6122 - 0{,}1076.\beta^2 + 0{,}3416.\beta^4 - 0{,}684.\beta^8$	$0{,}2368.\beta^{(1/2)} + 14{,}3.\beta^{(5/2)} - 12{,}86.\beta^{(9/2)}$	0,5
Rosemount 1195IO**			
Borda quadrante	1,005529	6,75	0,5
Borda canto vivo	$a1+b1.\beta+c1.\beta^2+d1.\beta^3+e1.\beta^4$	$f1+g1.\beta+h1.\beta^2+i1.\beta^3+j1.\beta^4$	0,5

	a1	b1	c1	d1	e1	f1	g1	h1	i1	j1
D = 1/2" (12,7 mm)	0,588423	-0,0781786	1,20573	-3,378356	2,854437	3,146978	-17,54468	56,26178	-77,01062	52,11968
D = 1" (25.4 mm)	0,595342	-0,0389047	0,2588337	-0,346828	0,07300363	1,408031	0,6620094	-6,079081	12,1711	6,377415
D = 1.1/2" (38.1 mm)	0,6051001	-0,1111218	0,2830634	-0,040353	-0,3459831	2,337983	-13,71296	66,42804	-124,0909	89,79559

** o fabricante deve ser consultado para informação exata do coeficiente, limites de números de Reynolds e tamanho.

Fonte: adaptada de Miller, 1996.

Tabela 3.2: Coeficiente de vazão (*K*) do orifício.

Diâmetro do tubo (Polegadas)	Orifícios (Polegadas)	Coeficiente de Vazão (K)
½	0.020	0.670
	0.035	0.642
	0.065	0.628
	0.113	0.612
	0.150	0.608
	0.196	0.608
	0.270	0.619
	0.340	0.642
1	0.020	0.645
	0.035	0.635
	0.065	0.620
	0.113	0.605
	0.150	0.604
	0.196	0.603
	0.270	0.604
	0.340	0.605
	0.500	0.630
	0.612	0.666
	0.735	0.715
1 ½	0.500	0.611
	0.612	0.614
	0.750	0.623
	0.917	0.650
	1.127	0.714

Fonte: adaptada de ABB, 1330L, Séries.

Segundo Delmée (2003), para placas de orifício são encontradas equações normalizadas, como as de Buckingam, Jean Stolz e Reader-Harris & Gallagher.

A Equação (3.17) de Reade-Haris-Gallacher RHG, proposta em 1998, é usada em placas de orifício para o calculo do coeficiente de descarga e somente válida para um intervalo de rugosidade de tubulação e outros limites impostos referentes ao tipo de tomada de pressão diferencial, adotadas pela ISO 5167-2:2003(E). Dentro deste contexto os Orifícios Integrais não estão inclusos.

$$C = \left(\begin{array}{l} 0{,}5961 + 0{,}0261 \cdot \beta^2 - 0{,}216 \cdot \beta^8 + 0{,}00521 \cdot \left(10^6 \cdot \beta / \mathrm{Re}\right)^{0{,}7} + \\ \quad \left(0{,}0188 + 0{,}0063 \cdot A\right) \cdot \beta^{3.5} \cdot \left(10^6 / \mathrm{Re}\right)^{0{,}3} + \\ \quad \left(0{,}043 + 0{,}08 \cdot e^{-10 \cdot L1} - 0{,}123 \cdot e^{-7 \cdot L1}\right) \cdot \left(1 - 0{,}11 \cdot A\right) \cdot \beta^4 / (1 - \beta^4) - \\ \quad 0{,}031 \cdot \left(M_2^{'} - 0{,}8 \cdot M_2^{' \, 1{,}1}\right) \cdot \beta^{1{,}3} \end{array} \right) \tag{3.17}$$

Para um diâmetro interno de tubo de medida D < 71,12 mm utiliza-se a Equação (3.18)

$$C' = C + 0{,}011\left(0{,}75 - \beta\right) \cdot [2{,}8 - \left(D / 25{,}4\right) \tag{3.18}$$

Sendo que, d é o diâmetro do orifício (mm), D é o diâmetro interno da tubulação (mm), β, é a relação de áreas e Re é o número de Reynolds.

Os parâmetros M'_2 e A são expressos respectivamente por:.

$$M_2^{'} = 2 \cdot L_2^{'}\left(1 - \beta\right) \tag{3.19}$$

$$A = \left(19000 \cdot \beta / \mathrm{Re}\right)^{0{,}8} \tag{3.20}$$

Os valores de L_1 e L'_2 são dependentes de como as tomadas de pressão diferencial são medidas: corner tapping, $L_1 = L'_2 = 0$, flange tapping, $L_1 = L'_2 = 25{,}4/D$ e radius tapping, $L_1 = 1$, $L'_2 = 0{,}47$.

3.2.3 Equação usual em medição vazão com orifícios

A Equação (3.8) pode ser escrita para um tubo de corrente, representada pela Figura 3.7, para cada seção S_1 e S_2, através da seguinte equação:

$$\frac{V_1^2}{2 \cdot g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 \tag{3.21}$$

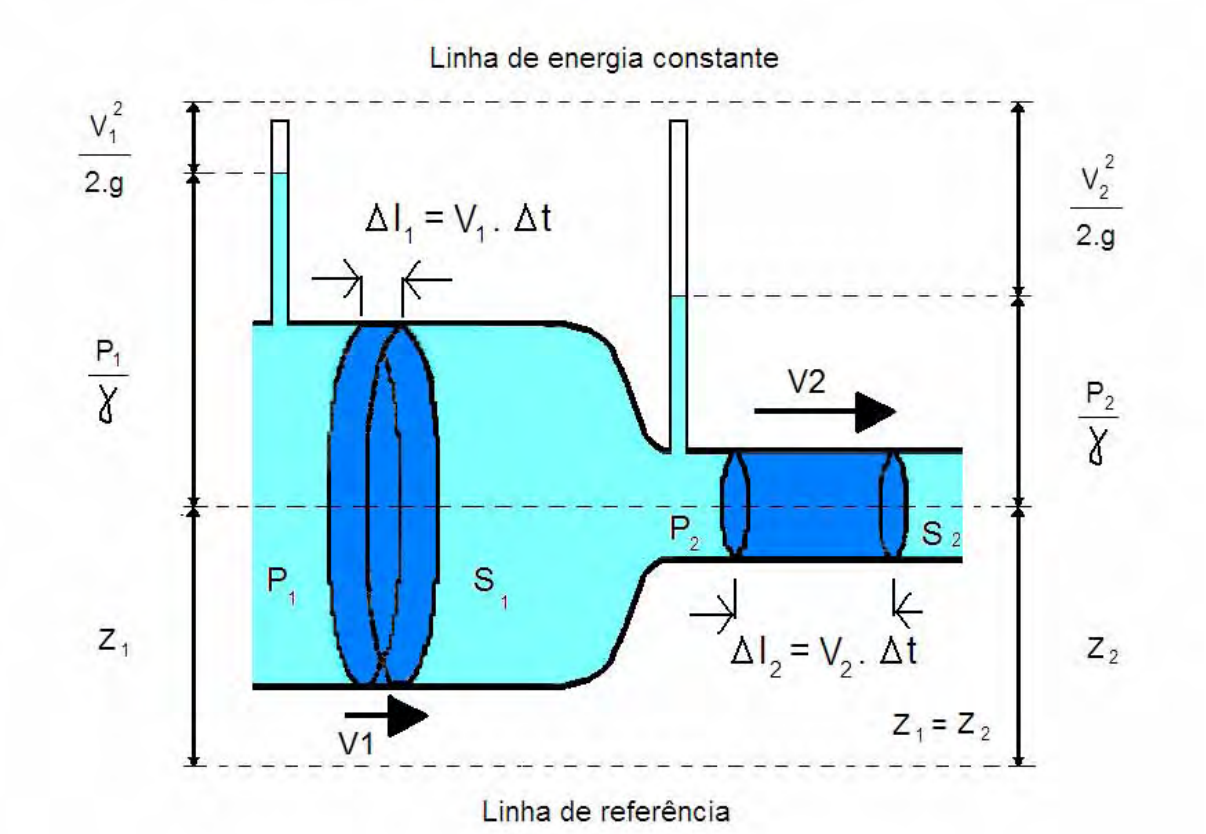


Figura 3.7: Linha de corrente na horizontal.

Mas, como $Z_1 = Z_2$, logo:

$$\frac{V_1^2}{2 \cdot g} + \frac{P_1}{\gamma} = \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + \frac{P_2}{\gamma} \tag{3.22}$$

Agrupando os termos:

$$\frac{V_2^2 - V_1^2}{2 \cdot g} = \frac{P_1 - P_2}{\gamma} \tag{3.23}$$

Considerando a equação da continuidade, Equação (3.2), tem-se:

$$V_2 = \frac{V_1 \cdot S_1}{S_2} \tag{3.24}$$

Logo:

$$\frac{\left(\frac{V_1 \cdot S_1}{S_2}\right)^2 - V_1^2}{2 \cdot g} = \frac{P_1 - P_2}{\gamma} \tag{3.25}$$

$$V_1^2 \cdot \left(\left(\frac{S_1}{S_2} \right)^2 - 1 \right) = \left(\frac{P_1 - P_2}{\gamma} \right) \cdot 2 \cdot g \tag{3.26}$$

$$V_1^2 \cdot \left(\frac{1}{(S_2/S_1)^2} - 1 \right) = \left(\frac{P_1 - P_2}{\gamma} \right) \cdot 2 \cdot g \tag{3.27}$$

$$V_1^2 = \frac{\left(\frac{P_1 - P_2}{\gamma} \right) \cdot 2 \cdot g}{\left(\frac{1}{(S_2/S_1)^2} - 1 \right)} \tag{3.28}$$

$$V_1 = \left[\frac{\left(\frac{P_1 - P_2}{\gamma} \right) \cdot 2 \cdot g}{\left(\frac{1}{(S_2/S_1)^2} - 1 \right)} \right]^{1/2} \tag{3.29}$$

$$V_1 = \frac{\sqrt{(P_1 - P_2)}\sqrt{2 \cdot g}}{\sqrt{\gamma} \cdot \sqrt{\frac{1}{((S_2/S_1))^2} - 1}} \tag{3.30}$$

Da relação das áreas β, Equação (3.15), pode-se escrever:

$$V_1 = \frac{\sqrt{(P_1 - P_2)}\sqrt{2 \cdot g}}{\sqrt{\gamma} \cdot \sqrt{\frac{1}{(\beta^2)^2} - 1}} \tag{3.31}$$

Mas, se o peso específico é dado por $\gamma = \rho \cdot g$, então:

$$V_1 = \frac{\sqrt{(P_1 - P_2)}\sqrt{2 \cdot g}}{\sqrt{\rho \cdot g} \cdot \sqrt{\frac{1}{\beta^4} - 1}} \tag{3.32}$$

Mas, $\Delta p = (P_1 - P_2)$, logo:

$$V_1 = \frac{\sqrt{2 \cdot \Delta p}}{\sqrt{\rho} \cdot \sqrt{\frac{1}{\beta^4} - 1}} \tag{3.33}$$

$$V_1 = \frac{\sqrt{2 \cdot \Delta p}}{\sqrt{\rho} \cdot \sqrt{\frac{1-\beta^4}{\beta^4}}} \tag{3.34}$$

$$V_1 = \frac{\sqrt{\beta^4} \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p}}{\sqrt{\rho} \cdot \sqrt{1-\beta^4}} \tag{3.35}$$

$$V_1 = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \frac{\beta^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p}}{\sqrt{\rho}} \tag{3.36}$$

Mas, $Qteórico_{vol} = V_1 \cdot S_1$, logo:

$$Qteórico_{vol} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \beta^2 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot \Delta p}}{\sqrt{\rho}} \tag{3.37}$$

Substituindo o coeficiente de aproximação (*E*), Equação (3.11), logo:

$$Qteórico_{vol} = E \cdot \beta^2 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot \Delta p}}{\sqrt{\rho}} \tag{3.38}$$

Introduzindo o conceito do Coeficiente de Descarga (*C*), Equação (3.9), pode-se calcular a Vazão real, como:

$$Qreal_{Vol} = C \cdot E \cdot \beta^2 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot \Delta p}}{\sqrt{\rho}} \tag{3.39}$$

A equação de Bernoulli foi desenvolvida para fluidos incompressíveis, no entanto, nos casos reais a compressibilidade deve ser considerada e para isso introduz-se o fator de expansão isentrópico (ε), como se segue abaixo:

$$\varepsilon = 1 - \left(0{,}351 + 0{,}256 \cdot \beta^4 + 0{,}93 \cdot \beta^8\right) \cdot \left\{1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(1/k)}\right\} \tag{3.40}$$

onde: p_1 e p_2 são as pressões a montante e a jusante ao orifício, respectivamente, enquanto que *k* é a relação dos calores específicos, sendo aplicável somente se, $p_2/p_1 \geq 0{,}75$.

Logo:

$$Qreal_{Vol} = C \cdot E \cdot \beta^2 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \varepsilon \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot \Delta p}}{\sqrt{\rho}} \tag{3.41}$$

onde: Δp, P_1 e P_2 em (Pa); *Qreal* em (m^3/s); ρ em (kg/m^3); D e d em (m); C, E, β, ε e π (adimensionais).

A Equação (3.41) pode representar de forma geral o cálculo de vazão volumétrica. Nota-se que certos cuidados devem ser tomados ao se apresentar os resultados, pois existem convenções internacionais para expressar o volume e as condições de referência para gases e líquidos.

A outra forma de calcular a vazão seria escrever a Equação (3.41) como vazão mássica (*kg/s*) ao multiplicar a vazão volumétrica pela massa específica, sendo:

$$Qreal_{mássica} = C \cdot E \cdot \beta^2 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho} \tag{3.42}$$

Segundo Delmée (2003), ainda pode-se substituir a constante numérica, Equação (3.43) nas Equações (3.41) e (3.42), resultando as Equações (3.44) e (3.45).

$$\frac{\pi \cdot \sqrt{2}}{4} = 1{,}1107 \tag{3.43}$$

$$Qreal_{Vol} = 1{,}1107 \cdot C \cdot E \cdot \beta^2 \cdot D^2 \cdot \varepsilon \frac{\sqrt{\Delta p}}{\sqrt{\rho}} \tag{3.44}$$

$$Qreal_{mássica} = 1{,}1107 \cdot C \cdot E \cdot \beta^2 \cdot D^2 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{\Delta p \cdot \rho} \tag{3.45}$$

Além desta demonstração é comum encontrar equações desenvolvidas pelos próprios fabricantes de orifícios integrais, mas de forma geral todas originadas dos princípios básicos citados anteriormente.

Capítulo 4

MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Descrição da instalação e procedimento experimental

O experimento foi conduzido no Laboratório de Visualização de Escoamentos da Faculdade de Engenharia - UNESP - Ilha Solteira. Nesse laboratório foi inicialmente montada uma bancada conforme Figura 4.1.

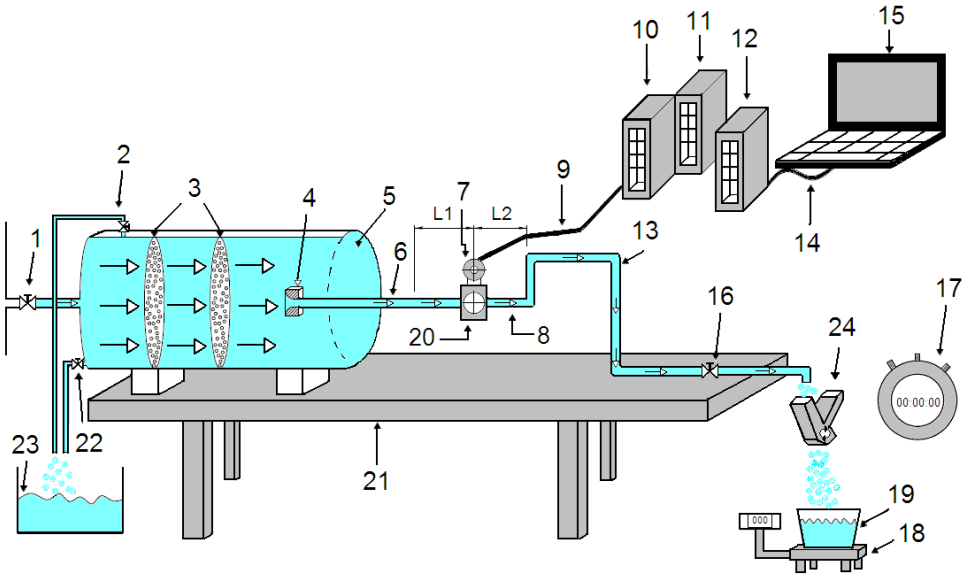


Figura 4.1: Esquema da bancada experimental.

O seu funcionamento é muito simples e pode ser descrito como se segue. A água proveniente da rede urbana (1) é alimentada a um tanque de estabilização cilíndrico (5) equipado com duas placas perfuradas (3), para impedir a propagação de instabilidades hidrodinâmicas até ao bocal de entrada (4). Um tubo de purga de ar (2) está ligado à parte superior da câmara de estagnação para remover as bolhas de gás. Um tubo de PVC com 17 mm de diâmetro interno (6) conduz o fluido para o medidor de fluxo, formada por um dispositivo de orifício integral (20), acoplado a um transmissor de pressão diferencial (7). Uma curva de elevação (13) foi inserida a jusante do medidor de fluxo para manter o tubo sempre cheio com água. Uma válvula de esfera (16) é usada para controlar o fluxo de fluido. A vazão mássica real é medida com precisão através de um sistema padrão, formado por, uma balança digital (18), um reservatório (19), um cronômetro (17), e uma válvula de desvio de

duas vias (24). Dados de queda de pressão através da placa de orifício são capturados automaticamente por meio de um sistema de aquisição de Smar. O sinal eléctrico a partir do transmissor diferencial (7) é conduzido para o sistema de processamento de sinal, constituído por uma fonte de alimentação de 24 V (10), um controlador digital (11), e um módulo de conversão de sinal (12). Os dados são transmitidos para um computador (15) através de um cabo flexível de uma ligação de rede RJ45 (14) e registados pelo software de captura de dados (15).

Foram coletados e avaliados os dados referentes a 30 corridas experimentais, ou tratamentos, variando-se a rugosidade dos tubos (2 rugosidades), a excentricidade da placa (uma concêntrica e duas excêntricas) e a forma da placa de orifícios (formas definidas pelas combinações entre 3 diâmetros do orifício a três tipos de bordas - canto vivo, cônica e ¼ de círculo), conforme apresentado na Tabela 4.1. Em cada tratamento, foram confeccionadas curvas da pressão em função da vazão. Posteriormente, estas curvas tiveram seus coeficientes comparados.

Tabela 4.1. Detalhamento dos tratamentos experimentais.

Formas de Placa de Orifícios	Tratamentos	
	Rugosidade Tubo 1	Rugosidade Tubo 2
Diâmetro 1 = 3,80 mm, Borda Canto Vivo, Concêntrica	E001	E016
Diâmetro 2 = 5,01 mm, Borda Canto Vivo, Concêntrica	E002	E017
Diâmetro 3 = 8,59 mm, Borda Canto Vivo, Concêntrica	E003	E018
Diâmetro 1 = 3,80 mm, Borda Canto Vivo, Excentricidade = d/2	E004	E019
Diâmetro 2 = 5,01 mm, Borda Canto Vivo, Excentricidade = d/2	E005	E020
Diâmetro 3 = 8,59 mm, Borda Canto Vivo, Excentricidade = d/2	E006	E021
Diâmetro 1 = 3,80 mm, Borda Canto Vivo, Excentricidade = d/4	E007	E022
Diâmetro 2 = 5,01 mm, Borda Canto Vivo, Excentricidade = d/4	E008	E023
Diâmetro 3 = 8,59 mm, Borda Canto Vivo, Excentricidade = d/4	E009	E024
Diâmetro 1 = 3,80 mm, Borda Cônica, Concêntrica	E010	E025
Diâmetro 2 = 5,01 mm, Borda Cônica, Concêntrica	E011	E026
Diâmetro 3 = 8,59 mm, Borda Cônica, Concêntrica	E012	E027
Diâmetro 1 = 3,80 mm, Borda 1/4 de Circulo, Concêntrica	E013	E028
Diâmetro 2 = 5,01 mm, Borda 1/4 de Circulo, Concêntrica	E014	E029
Diâmetro 3 = 8,59 mm, Borda 1/4 de Circulo, Concêntrica	E015	E030

Aos tratamentos acima listados, foram adicionados mais três tratamentos, E031, E032 e E033, com o objetivo de investigar interferências dimensionais de fabricação. Os três modelos escolhidos foram fabricados com o diâmetro 3,80 mm, borda em canto vivo, furo concêntrico e ensaiados com o tubo liso. O orifício do tratamento E031 foi fabricado em

alumínio, e os orifícios dos tratamentos E032 e E033 em inox AISI 316, sendo que o orifício de E033 é o E032 após um jateamento de areia na superfície a montante e a jusante.

Nas Figuras 4.2 a 4.7 são apresentados detalhes da bancada experimental.



Figura 4.2: Vista da bancada experimental.



Figura 4.3: Sistema de aquisição de dados.



Figura 4.4: Fonte de alimentação, módulo de conversão e controlador digital.



Figura 4.5: Orifício integral e transmissor de pressão.



Figura 4.6: Tanque de estabilização.



Figura 4.7: Balança digital e recipiente de coleta.

Os orifícios foram fabricados na Smar Indústria de Equipamentos Ltda. atendendo os rígidos requisitos exigidos pela ISA RP 3.2, conforme Figuras 4.8 a 4.11, alterando-se os diâmetros do orifício *d* = 3,80 em 5,01 e 8,59 mm e as excentricidades em *d*/2 e *d*/4 conforme o diâmetro utilizado, mantendo-se as demais dimensões das figuras citadas.

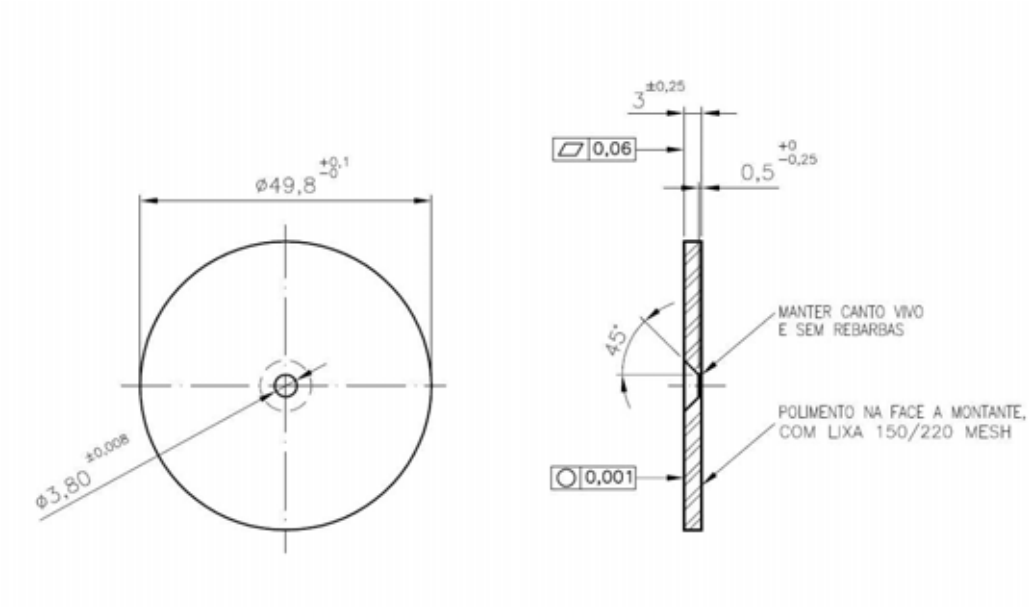


Figura 4.8: Orifício com furo concêntrico, diâmetro 3,80 mm e borda em canto vivo.

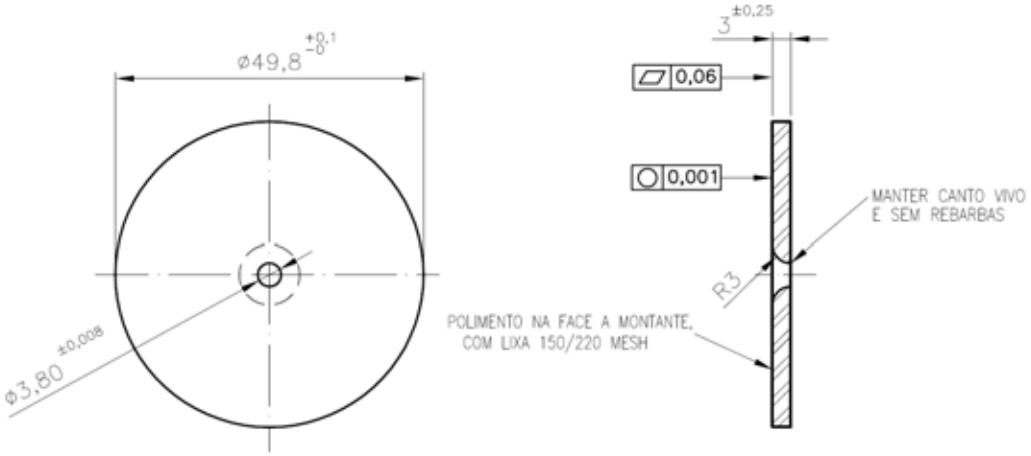


Figura 4.9: Orifício com furo concêntrico, diâmetro 3,80 mm e borda em ¼ de Círculo (quadrante).

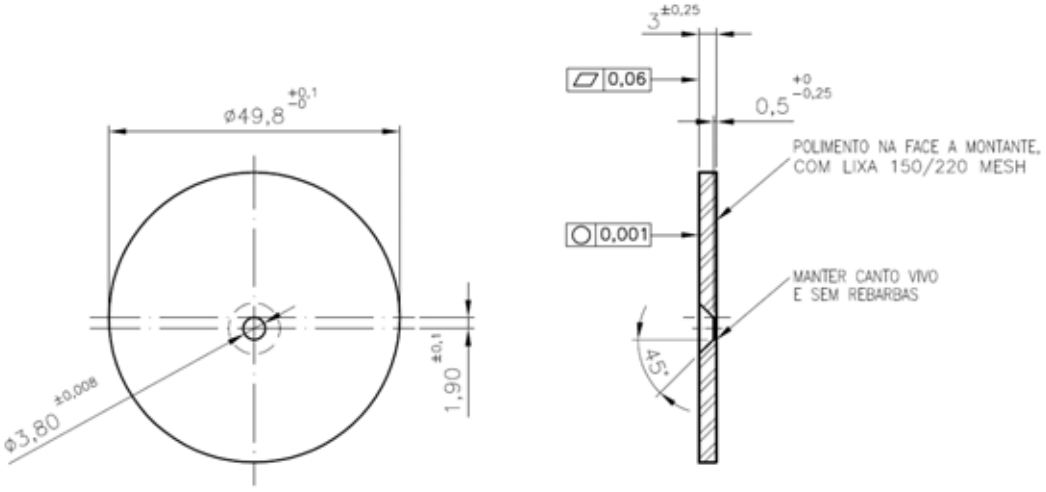


Figura 4.10: Orifício com furo 3,80 mm, borda concêntrica e excentricidades *d*/2.

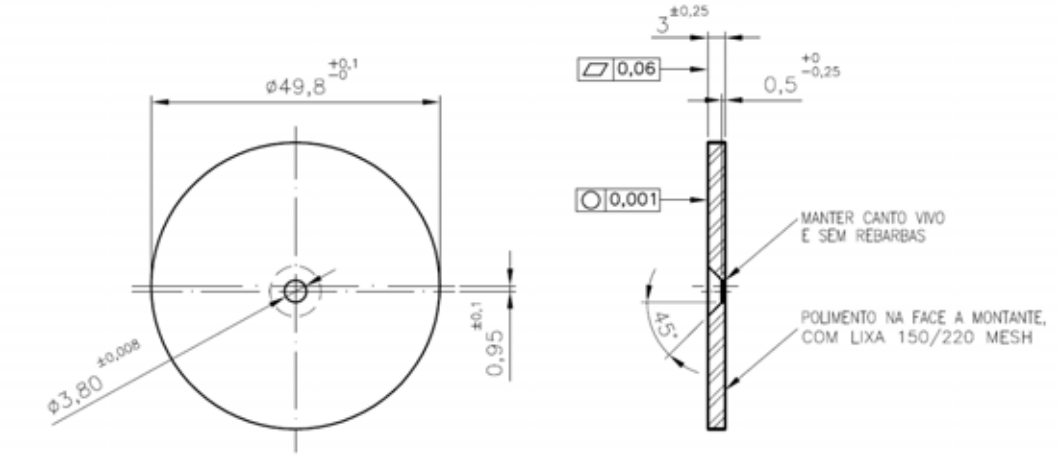


Figura 4.11: Orifício com furo 3,80 mm, borda concêntrica e excentricidades *d*/4.

O corpo do orifício integral é fabricado em inox AISI 316 foi fornecido pela Smar (Figura 4.12).



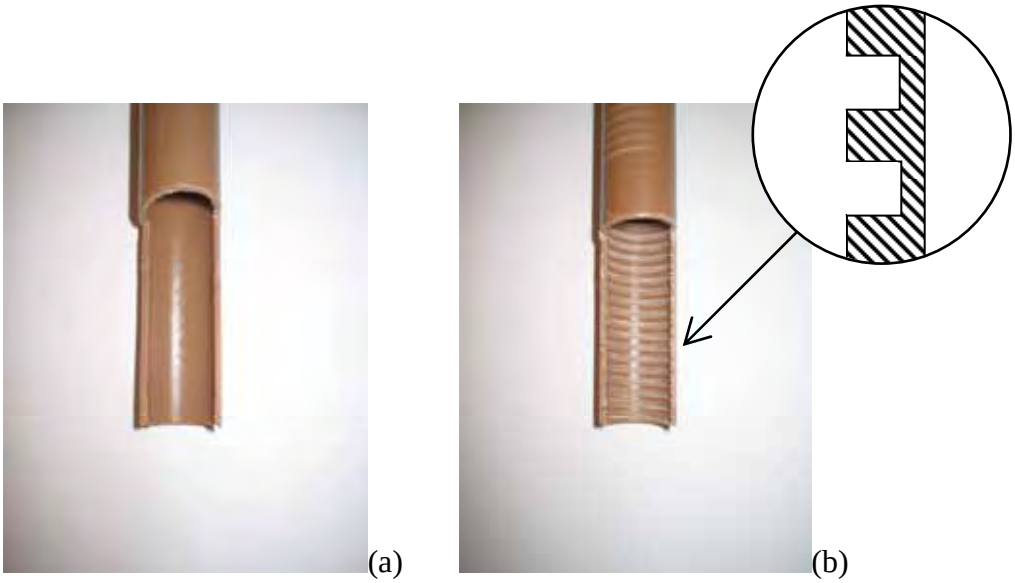
Figura 4.12: Corpo orifício integral de ½”.

O orifício era montado entre as duas partes do corpo e sua flange montada integralmente ao corpo do transmissor de pressão, conforme, Figura 4.13.



Figura 4.13: Montagem corpo integral de ½", orifício e transmissor de pressão.

Os tubos utilizados no experimento foram fabricados em PVC 6.3, segundo NBR 5648 PN 750 kPa de bitola de ½" com diâmetro externo 20 mm e diâmetro interno 17 mm. Uns dos tubos, chamado de Tubo 1, foi usado conforme padrão de rugosidade interna do fabricante, cujo valor médio, medido em laboratório foi de 0,8 µm Ra (rugosidade média). No outro tubo, chamado de Tubo 2, foi feito uma rosca interna com perfil quadrado, com intuito de causar uma rugosidade artificial bem acentuada. A rosca tinha canal com 1 mm de comprimento por 1mm de profundidade com um ângulo de avanço de 5 graus (Figura 4.14).



(a) (b)

Figura 4.14: Tubo 1 (a) e Tubo 2 (b) com perfil do dente quadrado.

O tanque de estabilização mostrado na Figura 4.6 tem a função de produzir um escoamento com baixo nível de turbulência e mínimas velocidades cruzadas através do seu escoamento até a entrada do bocal instalado na entrada do tubo que conduz o fluido até o orifício integral, para isso foram utilizadas duas placas perfuradas dispostas paralelas e perpendiculares no interior do tanque, como mostrado na Figura 4.1. Estas placas foram fabricadas em chapas de PVC com 60 furos de 5 mm de diâmetro e distribuídos radialmente.

O procedimento para coleta dos pontos para cada experimento, se deu da seguinte maneira: inicialmente abria-se a válvula para iniciar o fluxo de água pelo aparato e deixava-se o sistema em funcionamento com intuito de eliminar as possíveis bolhas excedentes no tanque e na tubulação, após isso ligava-se o sistema de aquisição de dados. Com este sistema operante abria-se a válvula até uma condição máxima sem saturar o limite máximo do transmissor de pressão (5000 mmca). Com o *software* de captura de dados observou-se o momento em que a pressão diferencial estava estabilizada, então foi colhida uma amostra de fluido por um determinado tempo para relacionar a vazão à pressão diferencial. Em média, por tratamento, levanta-se em média 35 pontos para confecção da curva (Figura 4.15). Os próximos pontos eram feitos de maneira semelhante, fechando-se a válvula, ou seja, indo da vazão maior para a menor, até limites perceptíveis do transmissor de pressão.

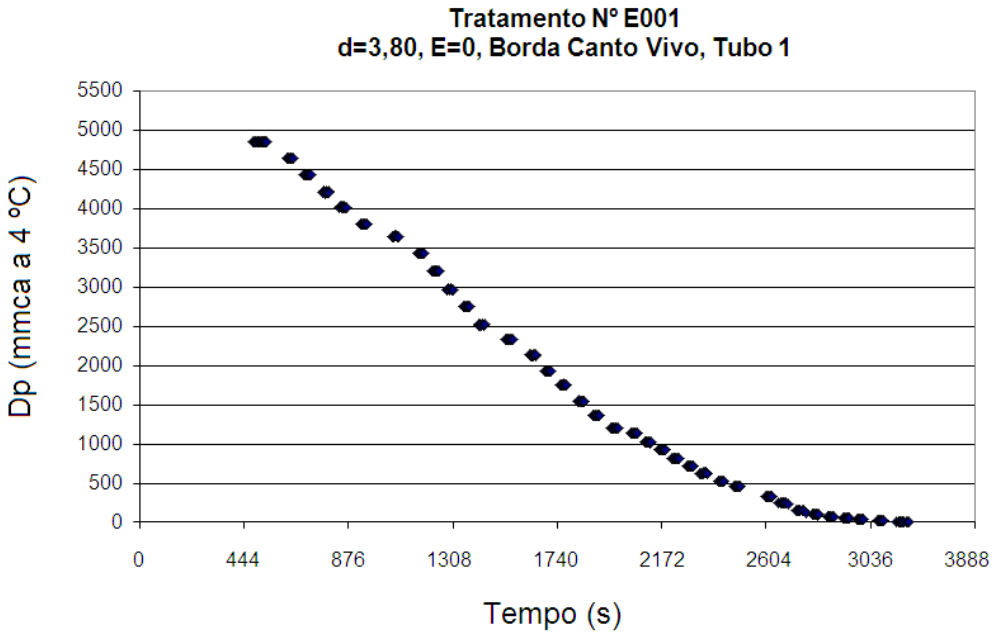


Figura 4.15: Gráfico de coleta de pressão diferencial *versus* do tempo do tratamento.

As massas coletadas, os tempos respectivos da coleta e a temperatura do fluido eram registrados permitindo calcular a vazão, para posteriormente relacionar a pressão diferencial

média pelo intervalo de coleta, permitindo a confecção de gráficos da vazão volumétrica *versus* pressão diferencial nas condições de operação, utilizando o *software* TB Curve 2D, conforme exemplificado na Figura 4.16.

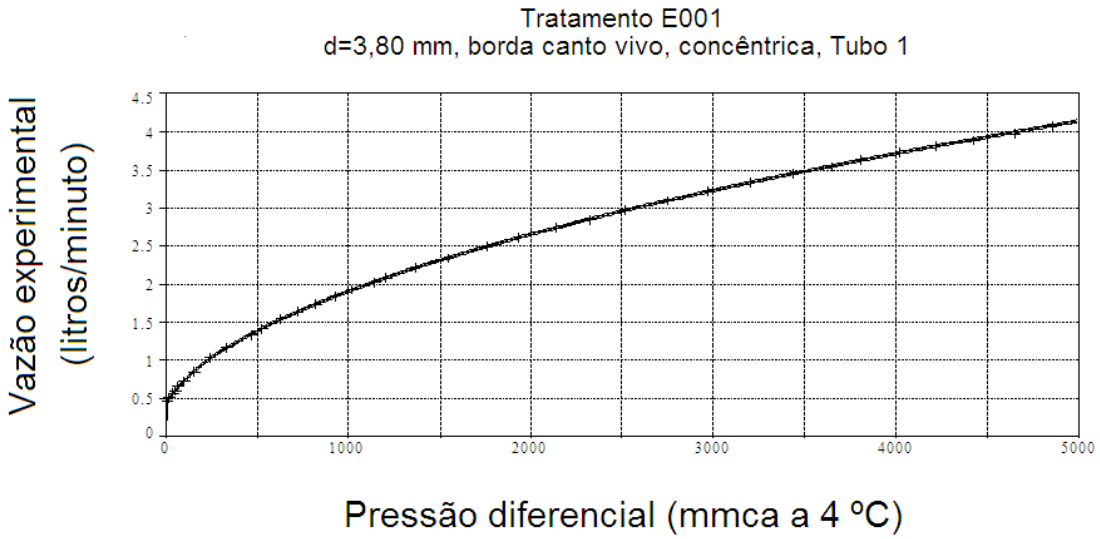


Figura 4.16: Gráfico da vazão *versus* pressão diferencial.

Para a investigação da intensidade turbulenta foi feito um experimento com a inserção de uma sonda anemométrica de fio quente (não calibrado) na região a jusante da placa de orifício, Figura 4.17. Foram feitos 15 medidas (IT001 a IT015), dentro das quais, de IT001 a IT007 foram para o tubo liso e as demais para o tubo rugoso. Os ensaios foram feitos com frequência de 30 kHz e coletados 131.072 pontos com tempo de amostragem de 4,369 s. Foram feitos gráficos de tensão de saída espectral *versus* tempo (Figura 4.18) e gráficos de amplitude espectral (Figura 4.19 e Figura 4.20) para cada tratamento e número de Reynolds da corrida.


(a)

(b)

Figura 4.17: Inserção da sonda de filme quente: vista (a) e vista (b).

A Intensidade turbulenta foi calculada pela Equação (4.1)

$$It = U' / \overline{U} \tag{4.1}$$

com

$$\overline{U} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} U_i \tag{4.2}$$

e

$$U' = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} \left(U_i - \overline{U} \right)^2} \tag{4.3}$$

Os valores de *Ui* é o valor medido da velocidade no i-ésimo instante e *N* é o número de amostras adquiridas.

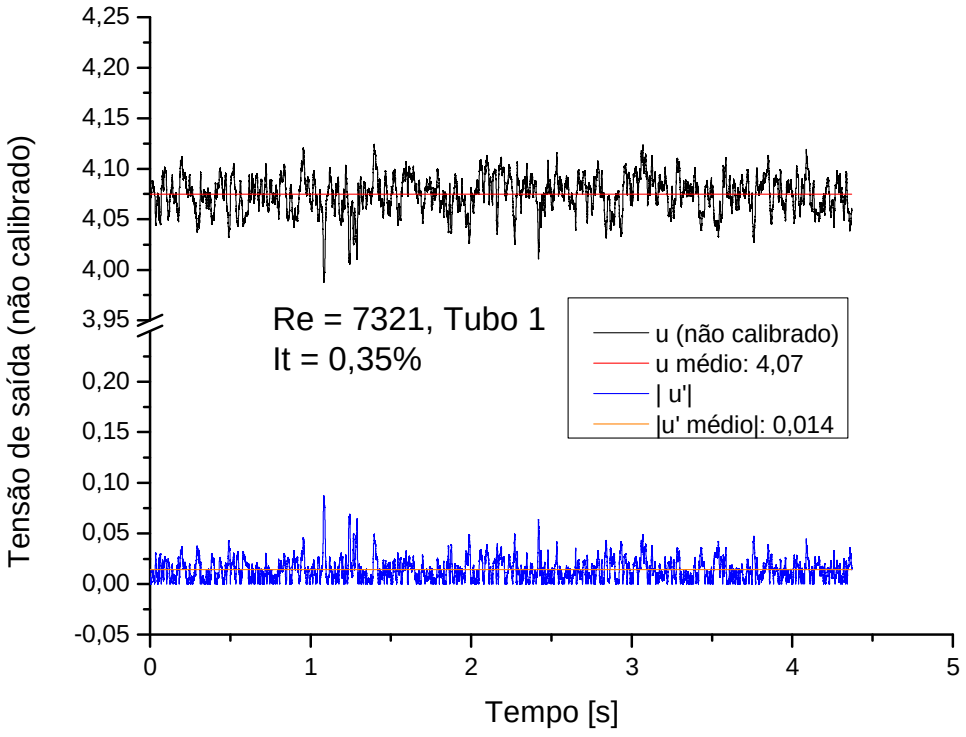


Figura 4.18: Tensão de saída *versus* tempo para o Tratamento IT001, Tubo 1, *Re* = 7321.

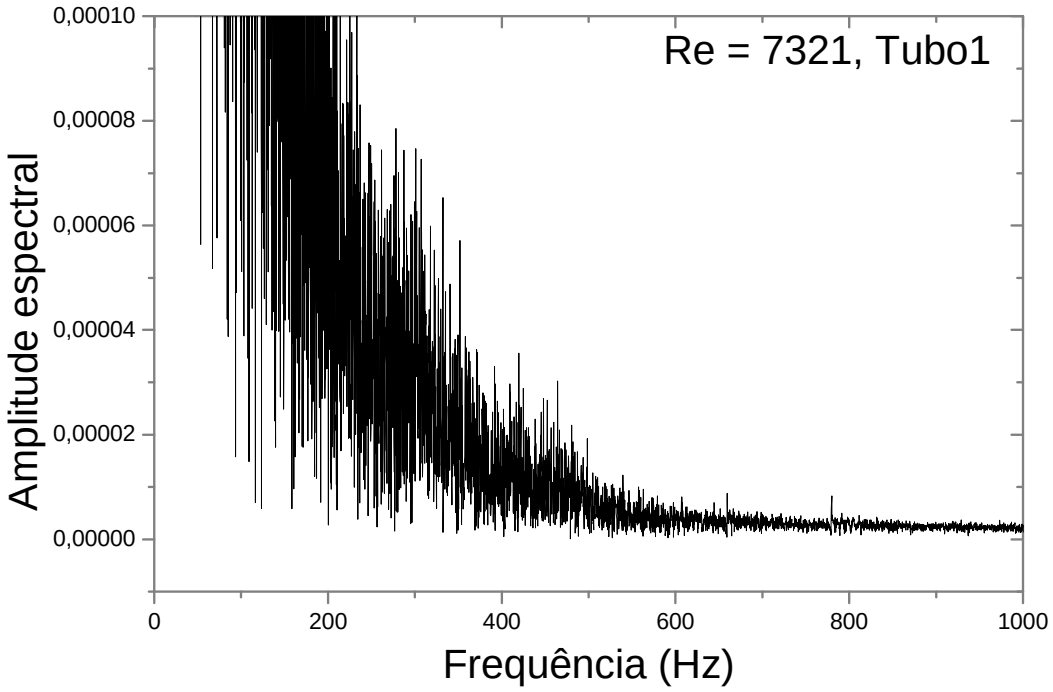


Figura 4.19: Amplitude espectral *versus* frequência para o Tratamento IT001.

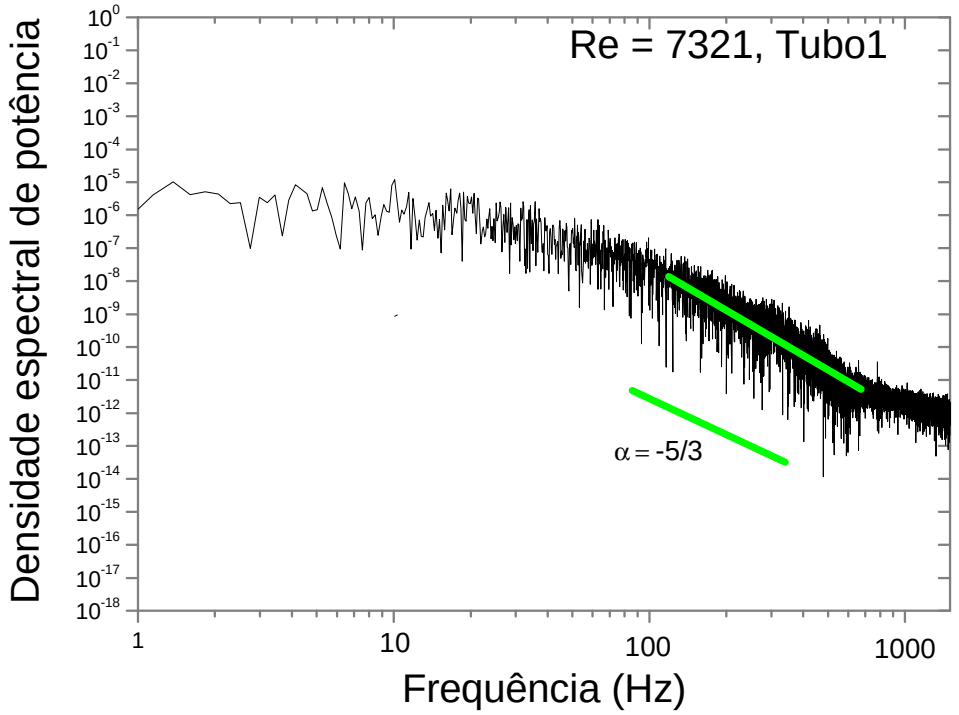


Figura 4.20: Densidade espectral de potência *versus* frequência para o Tratamento IT001.

4.2 Instrumentos utilizados

Alguns instrumentos utilizados neste experimento foram gentilmente cedidos pela Smar Indústria de Equipamentos Ltda. e outros pertenciam ao laboratório da Unesp:

- Transmissor de Pressão Diferencial, fabricante Smar, modelo: LD301D-21I-TU11-010 . A1/P0/Y2/J1 S/U302945 (Figura 4.21).
- Controlador Digital, fabricante Smar, modelo: CD600PLUS-A S/1907 (Figura 4.22).
- Módulo de Conversão de Sinal, fabricante Smar, modelo: ModBus CDBUS TCP 10/100 BASE-T ETHERNET - ENET-710 ENET-710 S/1277 (Figura 4.23).
- Fonte de alimentação 24 V, fabricante Smar, modelo, PS302-1(Figura 4.24).
- Balança Digital, fabricante Líder, Modelo: B-160; ID1050, com peso máximo de 10 kg e mínimo de 20 g. (Figura 4.25).
- Termômetro de coluna de mercúrio, fabricante TWG, modelo Labothern-N, com escala de 10-30ºC (Figura 4.26).
- Cronômetro Digital, fabricante Cronobio, modelo SW2018 (Figura 4.27).
- Sonda Anemômetro de Fio Quente, fabricante Dantec, Modelo 55R14 (Figura 4.28).
- Plataforma *StreamLine 90N10*, produzida pela *Dantec Measurement Technology*. Esse anemômetro possui três módulos *CTA 90C10*, que permitem a medição simultânea de até três componentes da velocidade local e instantânea. Os dados são coletados em uma placa *A/D NI-DAQmx 8.7.1* (16 bits), da *National Instrument* (Figura 4.29).



Figura 4.21: Transmissor de pressão diferencial.



Figura 4.22: Controlador digital.



Figura 4.23: Módulo de conversão de sinal.



Figura 4.24: Fonte de alimentação 24 V.



Figura 4.25: Balança digital.

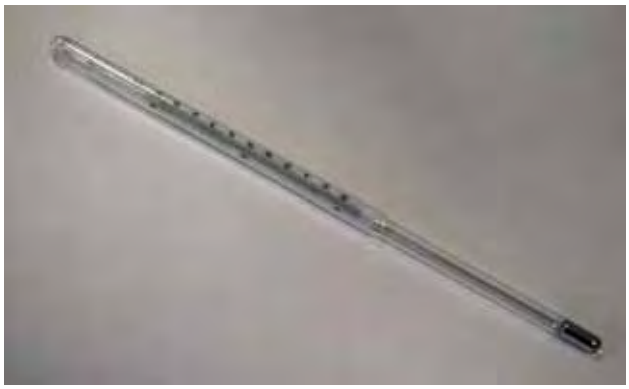
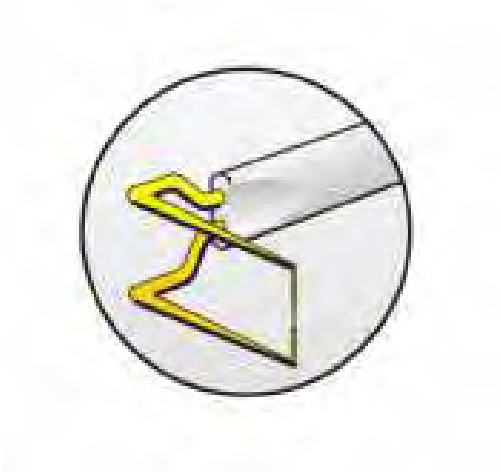


Figura 4.26: Termômetro de coluna de mercúrio.



Figura 4.27: Cronômetro digital.



www.dantecdynamics.com

Figura 4.28: Sonda anemométrica.



Figura 4.29: Anemômetro de fio quente de temperatura constante *Dantec StreamLine* (Bassan, 2011).

As incertezas dos equipamentos aqui relacionados são mencionadas no Apêndice B.

Capítulo 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados serão apresentados em forma de gráficos obtidos a partir do experimento realizado e equações obtidas desses gráficos. A discussão será baseada na literatura e observações do autor.

A curva fundamental para a base de dados obtida neste trabalho foi a curva vazão versus pressão diferencial, além desta, através de cálculos fundamentados nas equações apresentadas no Capítulo 3, chegou-se ao cálculo do coeficiente de Descarga (*C*), o qual foi plotado em função do número de Reynolds (Apêndice C).

5.1 Histerese

Comparações realizadas entre dados obtidos com vazão crescente e decrescente mostraram que o experimento apresenta baixo nível de histerese. De fato, os pontos experimentais do Tratamento E003, plotados na Figura 5.1, mostram que as curvas obtidas em ambos os sentidos - subida (da vazão menor para a maior) e descida (da vazão maior para a menor) – são praticamente coincidentes, sobretudo para *Re* > 5000.

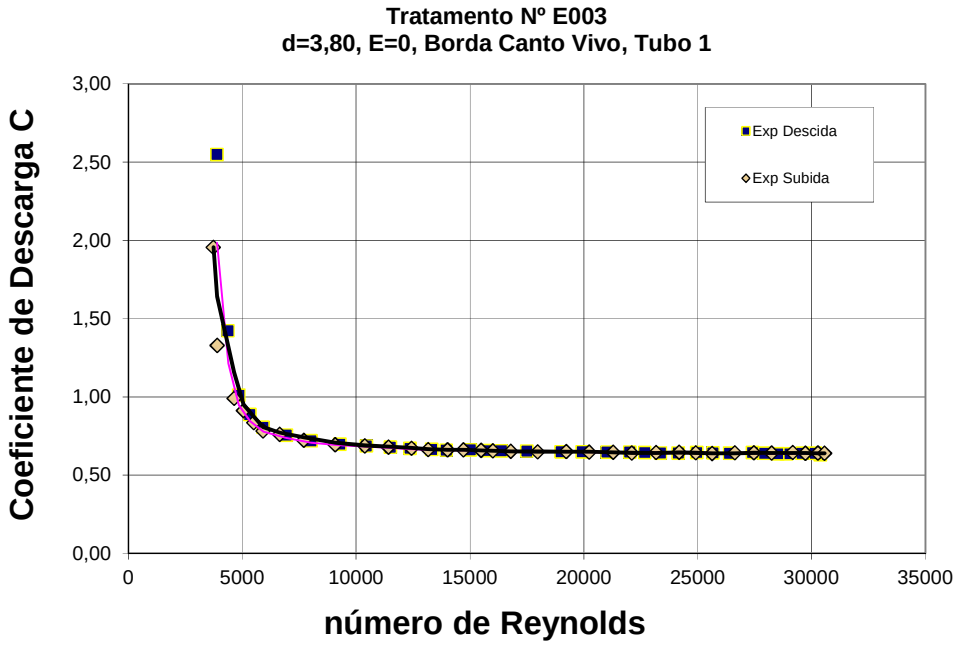


Figura 5.1: Histerese do coeficiente de descarga.

5.2 Vazão *versus* pressão diferencial

Para cada tratamento foi obtida a curva da vazão experimental pela pressão diferencial, totalizando 33 curvas, conforme discutido no Capítulo 4. Em função do grande número de curvas fica difícil apresentá-las, portanto as mesmas são apresentadas no Apêndice D deste trabalho. Para facilitar a abordagem do problema, os resultados são discutidos com ênfase nos primeiros tratamentos.

Na Figura 5.2 é apresentada a curva da vazão experimental pela pressão diferencial para o tratamento E001, onde foi utilizado orifício concêntrico com 3,80 mm de diâmetro, borda em canto vivo e tubo com rugosidade padrão de fabricação.

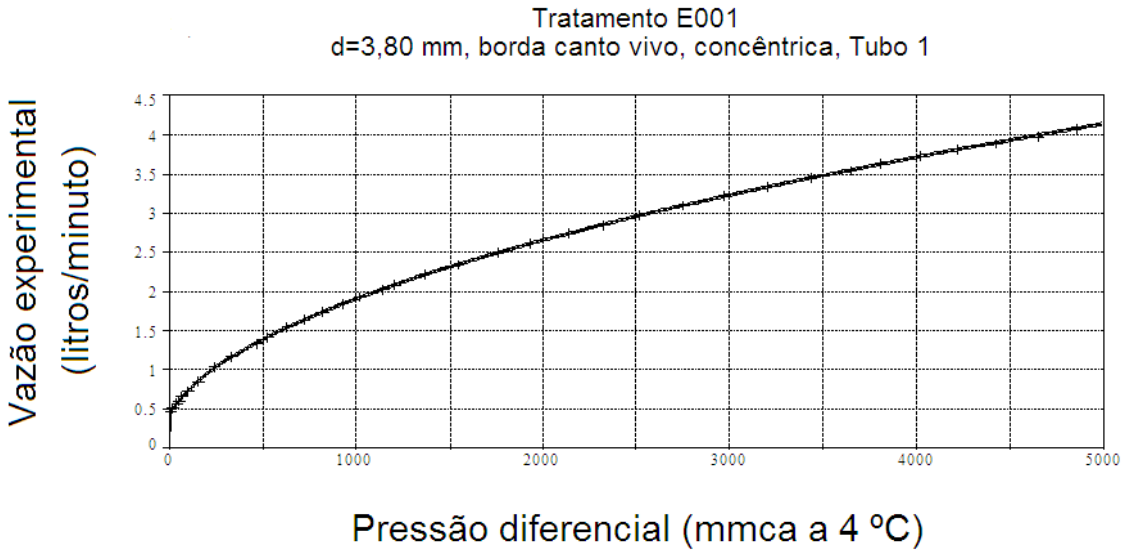


Figura 5.2: Curva da vazão experimental *versus* pressão diferencial, Tratamento E001.

Na Figura 5.2 pode-se notar o aumento da vazão em função do aumento da pressão diferencial. É possível verificar um ganho maior da vazão para uma pressão diferencial de até 500 mmca. A partir desta pressão, o ganho torna-se menor. De maneira geral, todas as curvas obtidas tiveram o mesmo comportamento, variando apenas a localização da pressão diferencial entre as partes de maior e de menor ganho de vazão da curva.

Foi observado que orifício integral com Borda ¼ de Círculo apresentou um Δp menor comparada às demais bordas para um mesmo número de Reynolds, podendo ser classificadas em função da Borda do orifício:

Δp para ¼ de Círculo < Δp para Cônica < Δp para Canto Vivo;

5.3 Curvas do coeficiente de descarga *versus* número de Reynolds

Estas curvas são de extrema importância neste estudo, pois são a base de comparação entre todos os tratamentos realizados. Da mesma forma, como comentado anteriormente, em função do número relativamente grande de curvas, as mesmas são apresentadas no Apêndice D deste trabalho.

A curva do coeficiente de descarga pelo número Reynolds para o Tratamento E001 é apresentada na Figura 5.3. Onde os pontos desta curva estão dentro do intervalo de confiança de 95%.

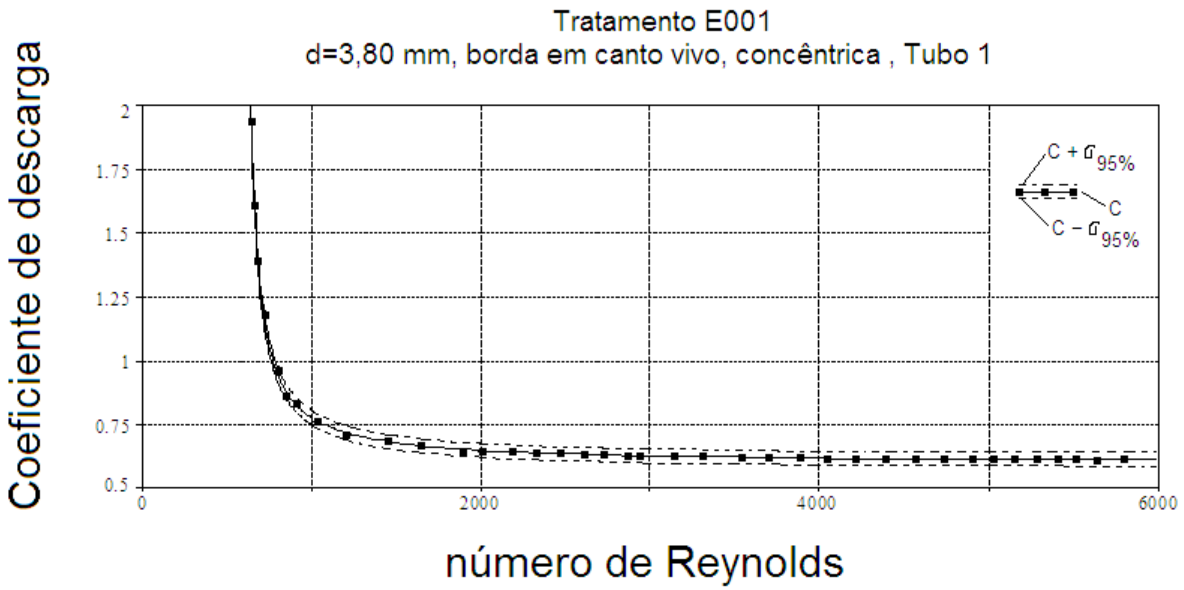


Figura 5.3: Curva coeficiente de descarga *versus* número de Reynolds, Tratamento E001.

Na Figura 5.3, pode-se notar o que o coeficiente de descarga *C* diminui em função do aumento do número de Reynolds. É possível verificar um decréscimo acentuado do coeficiente de vazão até um número de Reynolds de 1200 e um decréscimo menos acentuado a partir deste número de Reynolds. De maneira geral, todas as curvas obtidas tiveram o mesmo comportamento, variando apenas a localização do número de Reynolds que separa as regiões com maior e menor inclinação.

5.4 Curvas de ajuste

Normalmente, as curvas de ajuste são curvas usualmente utilizadas pelos fabricantes de Orifícios integrais (Miller, 1996), a exemplo a Equação (3.16) apresentada no Capítulo 3. A Figura 5.4 mostra a tendência dos coeficientes de descarga do Tratamento E001, prolongando-se linearmente ao longo do número de Reynolds até encontrar um valor de coeficiente próximo a 0,6 que se dá a um valor de número de Reynolds tendendo a infinito, Re_{∞}. Nota-se que o valor do coeficiente ajustado vai diminuindo esporadicamente à medida que se aumenta o número de Reynolds.

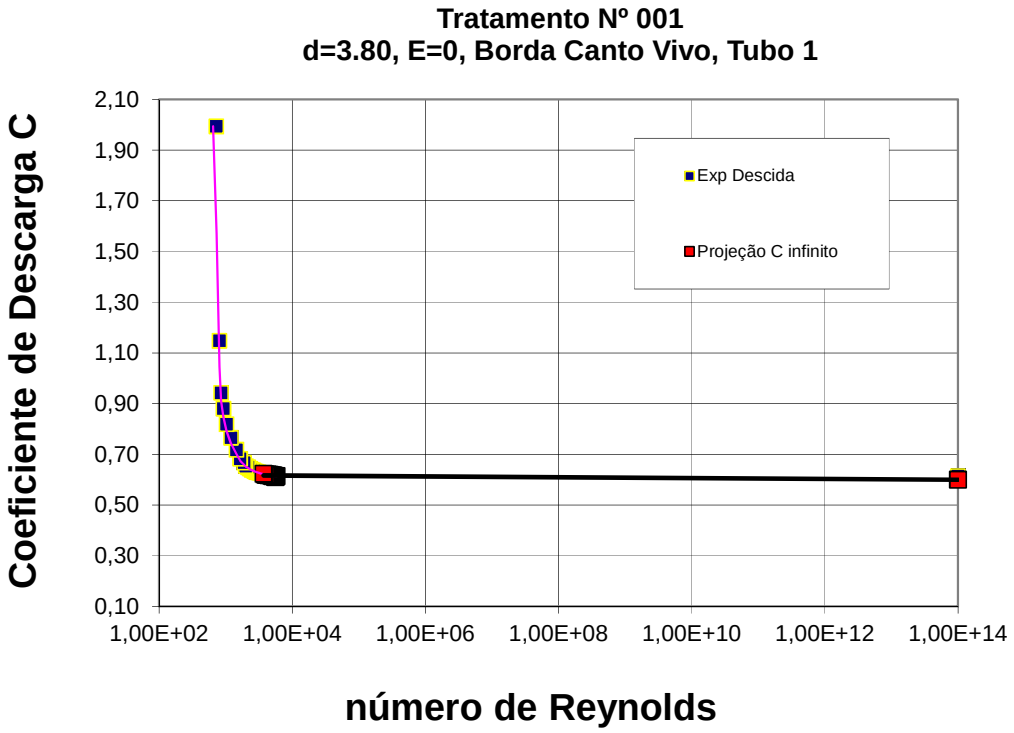


Figura 5.4: Curva de ajuste variável para coeficiente de descarga, para o Tratamento E001.

As placas com borda em canto vivo possuem o Coeficiente de Descarga tendendo ao infinito com uma forte tendência de concentração em 0,6. Para as demais bordas o coeficiente tende a se concentrar num ponto diferente. No entanto, dentro do experimento não se conseguiu definir corretamente o ponto em comum, indicando a necessidade de mais investigações sobre o assunto.

Segundo Miller (1996), outra forma de curva de ajuste para alguns fabricantes é a apresentação do coeficiente como uma constante para um determinado diâmetro de orifício,

ou seja, uma reta. Nos tratamentos experimentais foi adotado um coeficiente constante a partir da média dos coeficientes de descarga do intervalo de valores do número Reynolds compreendido entre o número de Reynolds inicial da observação e o número de Reynolds tendendo ao infinito, como demonstrado na Figura 5.5.

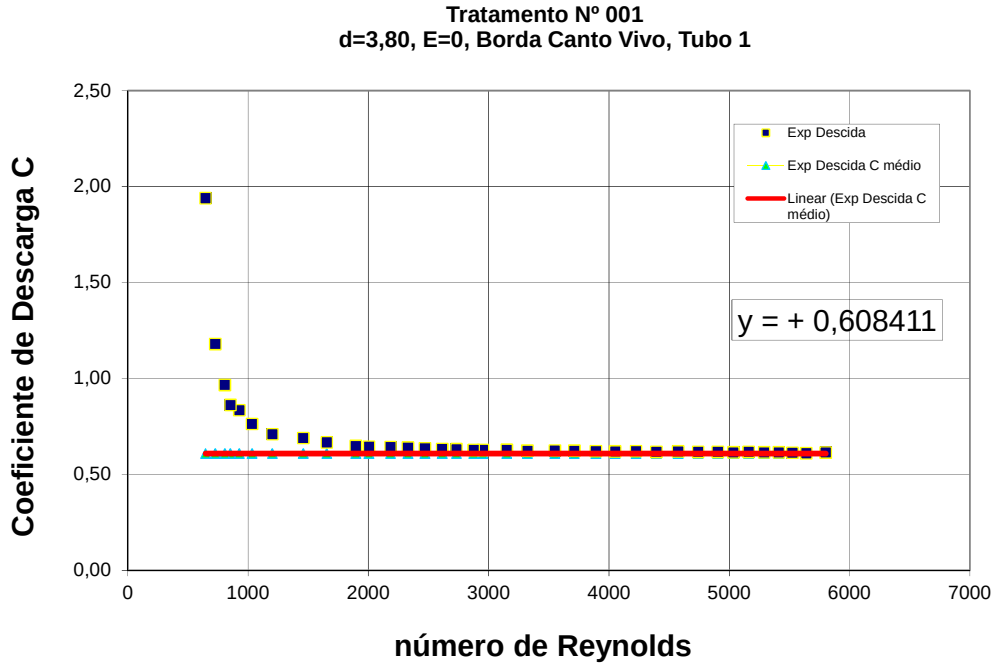


Figura 5.5: Curva de ajuste constante para coeficiente de descarga, para o Tratamento E001.

5.5 Equações obtidas

5.5.1 Equação da vazão pela pressão diferencial

A equação da vazão experimental (Q) pela pressão diferencial (Δp) é dada por:

$$Q = a + b \cdot \Delta p^{0.5} + \frac{c}{\Delta p^{0.5}} + \frac{d}{\Delta p^{2}} \qquad (5.1)$$

onde:

a,b,c,d são coeficientes tabelados (Tabela 5.1);

Δp é a pressão diferencial em mmca a 4ºC;

Q é a vazão em litros por minuto.

A seguir são apresentados os coeficientes da Equação (5.1), para diferentes tratamentos.

Tabela 5.1: Parâmetros para a Equação (5.1).

Tratamento	a	b	c	d	Δp (inicial)	Δp (final)	R^2
E001	0,059404	0,057549	0,940116	-4,665298	6,06	4857,44	0,999960
E002	0,096134	0,103069	1,702225	-7,553413	5,25	4905,38	0,999954
E003	0,377168	0,314206	5,776107	-21,235442	4,31	4306,44	0,999913
E004	0,000580	0,058148	0,927078	-10,772095	13,50	4729,00	0,999913
E005	0,046017	0,101647	1,356804	-8,234660	8,25	4648,00	0,999843
E006	0,160790	0,310859	5,341395	-27,500135	6,00	4352,00	0,999771
E007	0,029302	0,057567	0,861077	-7,723228	11,06	4830,06	0,999947
E008	0,060631	0,101735	1,258694	-5,855215	6,50	4709,00	0,999809
E009	0,246148	0,301733	3,386125	-12,342134	6,25	4503,00	0,999922
E010	0,079707	0,072946	1,173029	-8,145558	8,25	4818,50	0,999944
E011	0,060921	0,123748	2,482310	-15,627320	6,00	4377,00	0,999917
E012	-0,044656	0,375866	6,694431	-28,080393	7,25	3406,25	0,999813
E013	0,008667	0,088524	1,041610	-3,715278	4,82	4756,50	0,999959
E014	-0,001877	0,144861	1,858135	-5,672390	4,50	4649,95	0,999948
E015	0,328411	0,414574	5,374878	-14,362872	4,56	2988,94	0,999817
E016	0,077366	0,057691	0,863877	-3,724735	5,13	4747,50	0,999889
E017	0,125964	0,103268	1,780591	-8,836313	5,75	4859,88	0,999828
E018	0,457557	0,313427	4,118781	-13,784743	4,75	4145,00	0,999777
E019	0,051865	0,056654	0,889118	-4,400948	6,25	4858,31	0,999975
E020	0,114249	0,099438	1,398756	-5,046095	4,69	4759,06	0,999960
E021	0,249371	0,311153	0,311153	-26,669896	5,94	4276,81	0,999835
E022	0,100219	0,056512	0,783379	-2,282528	3,88	4834,75	0,999951
E023	0,090301	0,100775	1,664357	-7,914852	5,94	4815,00	0,999829
E024	0,324403	0,304266	4,402837	-16,708951	4,81	3789,88	0,999928
E025	0,115909	0,072370	1,140750	-5,400812	6,00	4758,44	0,999949
E026	0,175241	0,122304	1,950514	-8,646566	4,94	4729,25	0,999935
E027	0,315177	0,369384	6,442902	-33,333737	5,88	3466,56	0,999713
E028	0,017230	0,088447	1,509320	-7,370997	5,81	4880,19	0,999938
E029	0,122344	0,142227	1,918597	-7,297496	5,69	4829,06	0,999937
E030	0,408172	0,415781	5,929815	-24,315714	5,69	2857,25	0,999931
E031	0,073905	0,061269	0,969672	-3,944172	4,83	4794,81	0,999952
E032	0,084534	0,060569	0,908546	-2,799641	4,19	4788,88	0,999961
E033	0,058957	0,060691	0,969755	-4,320771	5,31	4828,75	0,999965

Na Figura 5.6 pode-se verificar o desvio de ajuste da Equação (5.1) para o tratamento E001. Nota-se que os maiores desvios, aproximadamente 1,5%, se dão em números de Reynolds abaixo de 1.500, prevalecendo um desvio de 0,5% a partir deste número de Reynolds até 6.000. O coeficiente de correlação R^2 da equação apresentada foi de 0,9999. Os demais desvios se encontram no Apêndice D.

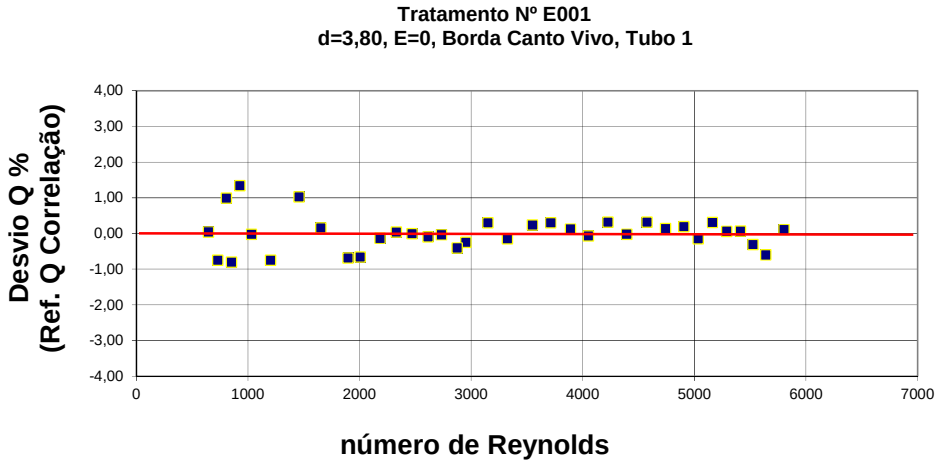


Figura 5.6: Desvio da vazão para o Tratamento E001.

5.5.2 Equação do coeficiente de descarga pelo número de Reynolds

A equação do coeficiente de descarga (C) pelo número de Reynolds (Re_D) é dada por:

$$C = \frac{a + c \cdot \mathrm{Re}_D^{\,0.5}}{1 + b \cdot \mathrm{Re}_D^{\,0.5} + d \cdot \mathrm{Re}_D} \tag{5.2}$$

onde:

a,b,c,d são coeficientes tabelados (Tabela 5.2);

Re_D é o número de Reynolds do escoamento (adimensional);

C é o coeficiente de Descarga (adimensional).

Na Tabela 5.2 o termo *C médio*, refere-se ao valor médio do coeficiente de descarga C para o intervalo do número de Reynolds inicial e número de Reynolds tendendo ao infinito.

Tabela 5.2: Parâmetros para a Equação (5.2).

Ensaio	a	b	c	d	Re_D (inicial)	Re_D (final)	R^2	C médio
E001	0,501194	-0,041487	-0,023034	2,026280E-05	647,58	5803,15	0,997383	0,608411
E002	0,485645	-0,031433	-0,017069	2,077550E-05	1152,16	10453,44	0,998231	0,618096
E003	0,520524	-0,016706	-0,009605	3,370030E-06	3888,88	30184,86	0,985605	0,631955
E004	0,493564	-0,045759	-0,024627	3,897940E-05	588,91	5767,72	0,994751	0,608537
E005	0,498365	-0,034235	-0,018780	1,883580E-05	1002,07	10183,44	0,994873	0,614596
E006	0,489787	-0,018284	-0,009871	7,151430E-06	3425,99	30660,72	0,995729	0,622160
E007	0,496686	-0,044047	-0,024101	2,706890E-05	609,59	5879,62	0,989534	0,605766
E008	0,495060	-0,034487	-0,018945	1,873620E-05	977,54	10276,90	0,996460	0,612815
E009	0,507809	-0,019670	-0,010981	3,704530E-06	2926,91	29380,24	0,995999	0,611548
E010	0,607136	-0,037514	-0,025673	2,311150E-05	828,48	7403,39	0,995936	0,774259
E011	0,528873	-0,029695	-0,017994	2,856350E-05	1366,72	12018,13	0,999903	0,742298
E012	0,663132	-0,016017	-0,011097	3,053000E-06	4201,80	31736,04	0,992751	0,744708
E013	0,746930	-0,039399	-0,032340	2,751000E-05	742,18	8819,40	0,997224	0,918720
E014	0,724690	-0,029449	-0,022943	1,477080E-05	1292,35	14168,89	0,998237	0,864541
E015	0,730283	-0,015585	-0,012244	1,461400E-06	4398,95	33792,79	0,984954	0,822734
E016	0,490633	-0,041408	-0,022938	2,087550E-05	654,96	5963,86	0,999349	0,609765
E017	0,508972	-0,029950	-0,017003	1,178430E-05	1242,08	10812,90	0,995346	0,623986
E018	0,499429	-0,017701	-0,009962	4,908500E-06	3603,24	30454,50	0,999523	0,623479
E019	0,497371	-0,042289	-0,023208	1,958000E-05	624,83	5735,47	0,999621	0,594887
E020	0,484047	-0,032565	-0,017643	1,571370E-05	1054,36	9824,26	0,995507	0,599832
E021	0,490031	-0,018186	-0,009910	6,572830E-06	3452,23	29448,45	0,997440	0,615190
E022	0,472730	-0,041014	-0,022103	2,342660E-05	660,45	5817,75	0,998023	0,605868
E023	0,490466	-0,031610	-0,017161	1,723080E-05	1135,20	10173,61	0,996091	0,608604
E024	0,486440	-0,018451	-0,010002	5,816400E-06	3306,91	27347,71	0,998684	0,611229
E025	0,616194	-0,035403	-0,024618	1,573230E-05	899,02	7569,24	0,999014	0,768917
E026	0,548963	-0,028436	-0,018061	1,836040E-05	1435,73	12696,16	0,999515	0,743414
E027	0,551613	-0,016621	-0,010294	7,847350E-06	4246,25	32250,26	0,998660	0,741012
E028	0,732062	-0,035446	-0,028477	2,818970E-05	915,22	8915,38	0,999201	0,922612
E029	0,737801	0,027022	-0,021767	5,667570E-06	1501,31	14443,42	0,995662	0,858814
E030	0,690441	-0,015654	-0,011903	3,032620E-06	4546,76	32954,15	0,997584	0,827734
E031	0,504313	-0,040992	-0,023353	3,111440E-05	676,60	6097,76	0,999357	0,629247
E032	0,527519	-0,039715	-0,023278	1,880070E-05	696,01	6047,30	0,999379	0,629033
E033	0,505541	-0,040918	-0,023138	3,031000E-05	673,96	6187,18	0,987670	0,627355

Na Figura 5.7 pode-se verificar os desvios obtidos da Equação (5.2), referente aos pontos experimentais. Nota-se que os maiores desvios aproximadamente 3% se dão em números de Reynolds abaixo de 1000, devido provavelmente a perda de exatidão do transmissor de pressão diferencial, prevalecendo um desvio de aproximado de 1% a partir deste número de Reynolds até 6000. O coeficiente de correlação R^2 da equação apresentada foi de 0,997383. Os demais desvios se encontram no Apêndice D. Para melhorar os desvios abaixo do número de Reynolds de 1000, poderia-se adicionar um transmissor de pressão com faixa de utilização menor e assim melhorar a exatidão da medida realizada.

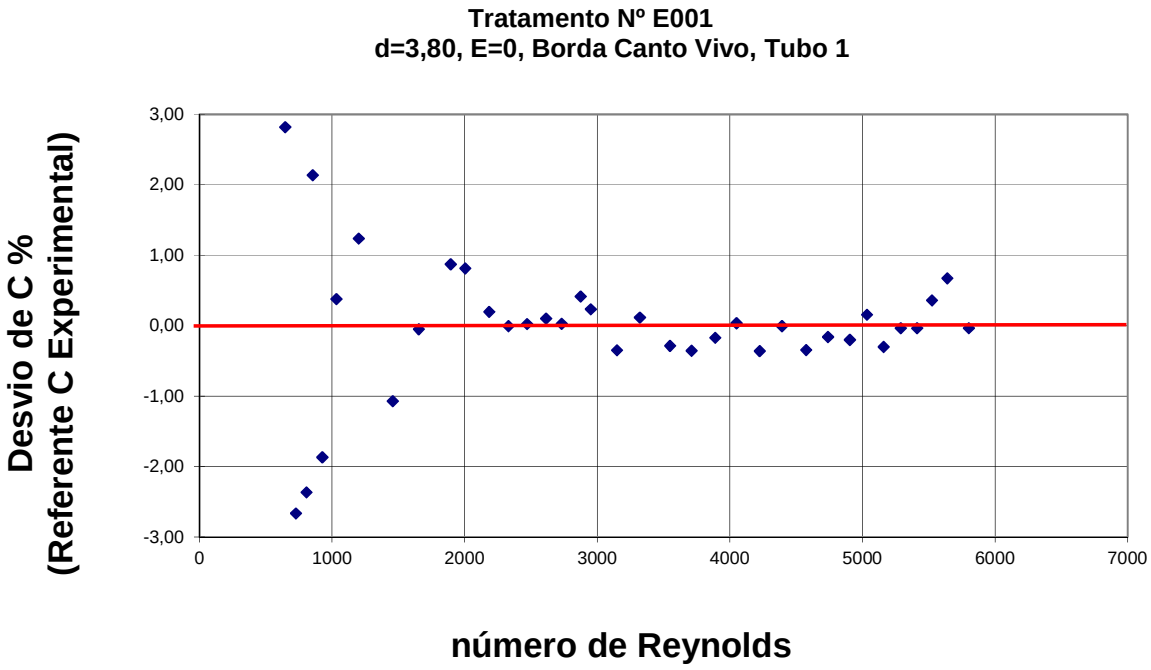


Figura 5.7: Desvio de C para o Tratamento E001.

5.5.3 Equações de ajuste

A equação de ajuste variável do coeficiente de descarga (C) pelo número de Reynolds (Re_D) é dado por:

$$C = C_{\infty} + \frac{b}{\mathrm{Re}_D{}^{n}} \tag{5.3}$$

onde:

b, n são coeficientes tabelados (Tabela 5.3);

Re_D é o número de Reynolds do escoamento, referente ao *C* que se queira determinar (adimensional);

C é o coeficiente de Descarga (adimensional);

C_∞ é o valor do coeficiente de descarga, considerando um $Re_D \infty$;

$Re_D \infty$ é o número de Reynolds da tubulação tendendo ao infinito.

Na Tabela 5.3 o termo *C médio* refere-se ao valor médio do coeficiente de descarga *C* para o intervalo do número de Reynolds inicial e final ($Re_D \infty$), indicados na mesma.

Tabela 5.3: Parâmetros para a Equação (5.3).

Ensaio	b	n	Re $_{inicial}$	Re $_{\infty}$	C para Re $_{inicial}$	C para Re $_{\infty}$	C médio
E001	1,086255	0,5	4000	1,00E+14	0,617175	0,600000	0,608588
E002	2,920167	0,5	4000	1,00E+14	0,646172	0,600000	0,623086
E003	7,583658	0,5	4000	1,00E+14	0,719908	0,600001	0,659954
E004	0,767256	0,5	4000	1,00E+14	0,612131	0,600000	0,606066
E005	1,609760	0,5	4000	1,00E+14	0,625453	0,600000	0,612726
E006	4,310005	0,5	4000	1,00E+14	0,668147	0,600000	0,634074
E007	0,724905	0,5	4000	1,00E+14	0,611462	0,600000	0,605731
E008	1,786525	0,5	4000	1,00E+14	0,628247	0,600000	0,614124
E009	2,595602	0,5	4000	1,00E+14	0,641040	0,600000	0,620520
E010	2,388299	0,5	4000	1,00E+14	0,792762	0,755000	0,773881
E011	2,909031	0,5	4000	1,00E+14	0,770996	0,725000	0,747998
E012	3,419655	0,5	4000	1,00E+14	0,784069	0,730000	0,757035
E013	2,492522	0,5	4000	1,00E+14	0,939410	0,900000	0,919705
E014	2,309517	0,5	4000	1,00E+14	0,886517	0,850000	0,868258
E015	8,997233	0,5	4000	1,00E+14	0,932259	0,790001	0,861130
E016	1,410955	0,5	4000	1,00E+14	0,622309	0,600000	0,611155
E017	3,511038	0,5	4000	1,00E+14	0,655514	0,600000	0,627757
E018	6,726990	0,5	4000	1,00E+14	0,706363	0,600001	0,653182
E019	1,769921	0,5	4000	1,00E+14	0,607985	0,580000	0,593993
E020	2,461376	0,5	4000	1,00E+14	0,623918	0,585000	0,604459
E021	6,082464	0,5	4000	1,00E+14	0,686172	0,590001	0,638086
E022	0,753438	0,5	4000	1,00E+14	0,611913	0,600000	0,605956
E023	2,116582	0,5	4000	1,00E+14	0,628466	0,595000	0,611733
E024	4,901446	0,5	4000	1,00E+14	0,667499	0,590000	0,628750
E025	2,842078	0,5	4000	1,00E+14	0,794937	0,750000	0,772469
E026	3,329819	0,5	4000	1,00E+14	0,777649	0,725000	0,751325
E027	5,171436	0,5	4000	1,00E+14	0,801768	0,720001	0,760884
E028	2,927495	0,5	4000	1,00E+14	0,946288	0,900000	0,923144
E029	4,147434	0,5	4000	1,00E+14	0,900577	0,835000	0,867789
E030	9,857767	0,5	4000	1,00E+14	0,945865	0,790001	0,867933
E031	4,038021	0,5	4000	1,00E+14	0,663847	0,600000	0,631924
E032	3,651337	0,5	4000	1,00E+14	0,657733	0,600000	0,628867
E033	3,406458	0,5	4000	1,00E+14	0,653861	0,600000	0,626931

Na Figura 5.8 pode-se verificar o desvio relativo ao coeficiente obtido experimentalmente de forma bem comportada e inferior a 1% à medida que se aumenta o número de Reynolds. Segundo Miller (1996), estas equações são feitas para serem usadas para um número de Reynolds a partir de 4.000. Os demais desvios se encontram no Apêndice D.

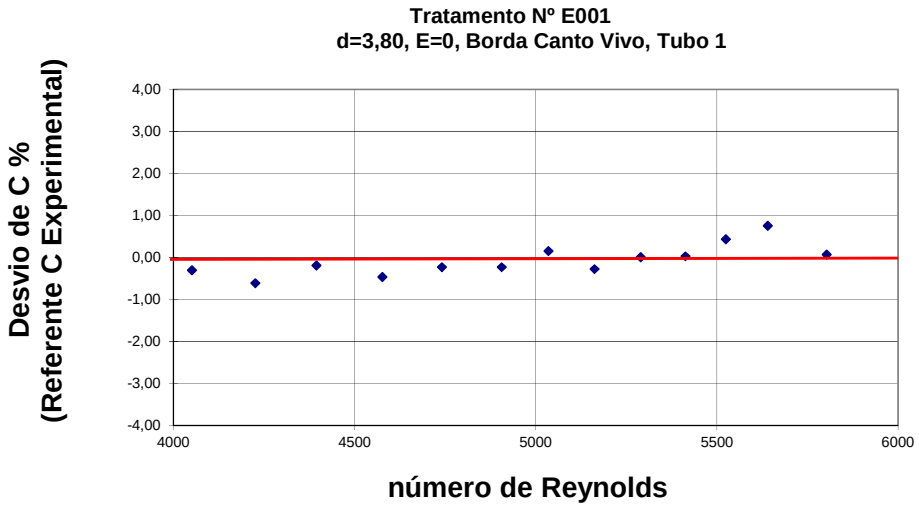


Figura 5.8: Desvio C com ajuste variável para o Tratamento E001.

Da mesma maneira que os coeficientes são gerados a partir da Equação (5.3) e usados a partir de um número de Reynolds de 4000 (Miller, 1996), pode-se notar para o mesmo intervalo de valores de números de Reynolds, uma piora no desvio relativo ao coeficiente de descarga *C* obtido experimentalmente a partir de um coeficiente constante, chegando até valores de 2% (Figura 5.9). Isto indica que o uso de um coeficiente variável com o número de Reynolds é mais apropriado que o emprego de uma simples constante.

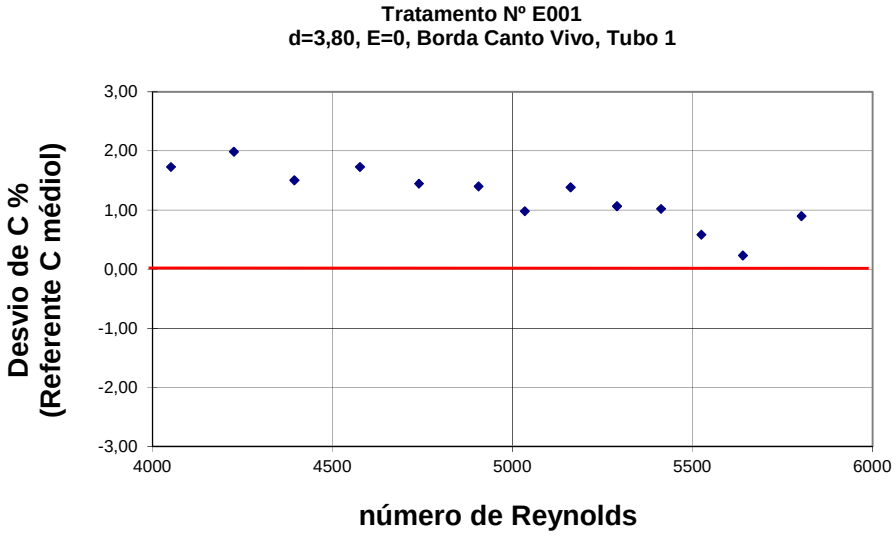


Figura 5.9: Desvio de C com ajuste constante para o Tratamento E001.

Pode-se verificar que os desvios ficaram acima, pois valor médio do coeficiente de descarga *C* foi para o intervalo do número de Reynolds inicial e número de Reynolds tendendo ao infinito, fazendo com que média ficasse abaixo, principalmente no início da escala.

5.5.4 Equações unificadas

Com o intuito de obter uma equação que representasse os tratamentos E001, E002 e E003, que do ponto de vista prático é o caso mais utilizado; orifício concêntrico de borda em canto vivo e com tubulação de ½ polegada em PVC com rugosidade padrão; foram desenvolvidos os coeficientes da Equação (5.2) e determinadas as Equações (5.4) a (5.7):

$$a = 9{,}610154 \cdot \beta^2 - 7{,}100758 \cdot \beta + 1{,}648854 \tag{5.4}$$

$$b = 1{,}850948 \cdot \beta^2 - 1{,}192094 \cdot \beta + 0{,}112197 \tag{5.5}$$

$$c = 1{,}110569 \cdot \beta^2 - 0{,}715256 \cdot \beta + 0{,}067318 \tag{5.6}$$

$$d = 5{,}251015 \cdot 10^{-15} \cdot \beta^2 - 1{,}515830 \cdot 10^{-14} \cdot \beta + 2{,}393973 \cdot 10^{-15} \tag{5.7}$$

Para obtenção das Equações (5.4) a (5.7), seguiu-se o seguinte procedimento: os pontos resultantes das Equações (5.2) e (5.3) foram unificados (Figura 5.10) e, posteriormente, para cada Tratamento (E001, E002 e E003) foi determinada a equação com melhor coeficiente de determinação R^2. Com esses resultados determinou-se individualmente a relação quadrática em função da relação de diâmetros (β).

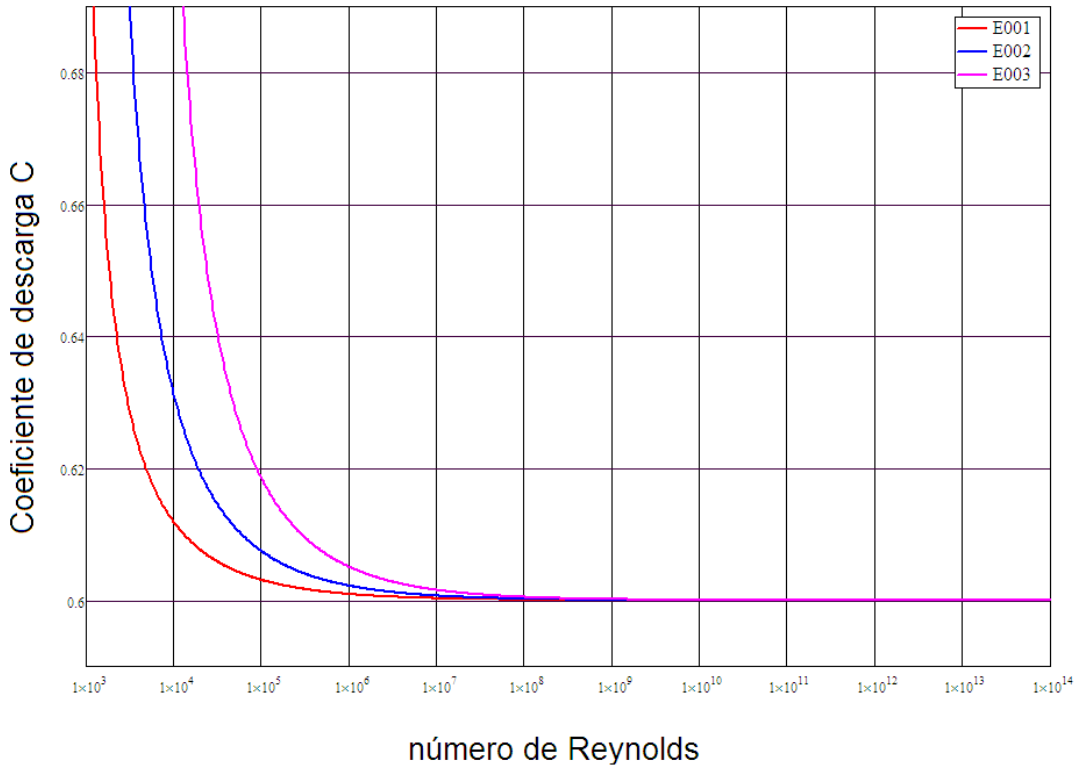


Figura 5.10: Curvas para Equações (5.2) e (5.3) unificadas.

Os desvios relativos aos coeficientes de descarga obtidos experimentalmente para as Equações (5.4) a (5.7) sob as condições pré-estabelecidas foram:

1% para $Re_D \geq 5000$ nos tratamentos E001 e E002, Figuras 5.11 e 5.12 e

5% para $Re_D = 5000$ caindo continuamente até $Re_D \geq 25000$ quando se estabiliza a 1% no Tratamento E003, Figura 5.13.

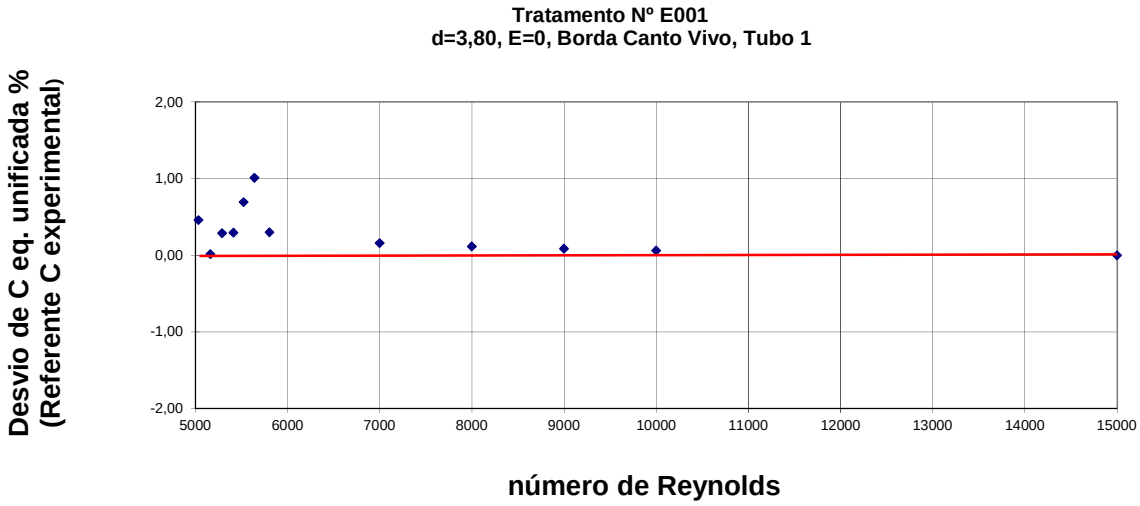


Figura 5.11: Desvio de *C* para equação unificada, para o Tratamento E001.

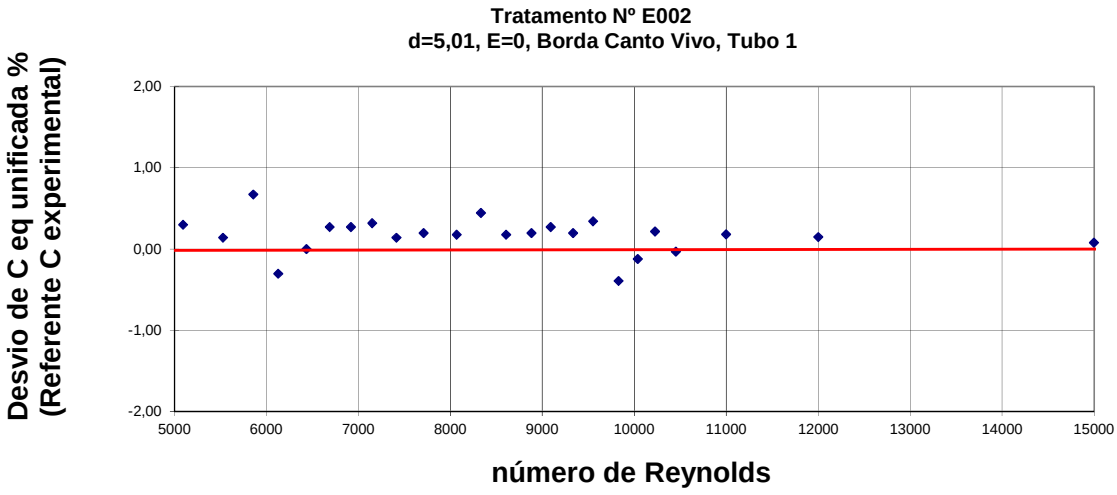


Figura 5.12: Desvio de *C* para equação unificada, para o Tratamento E002.

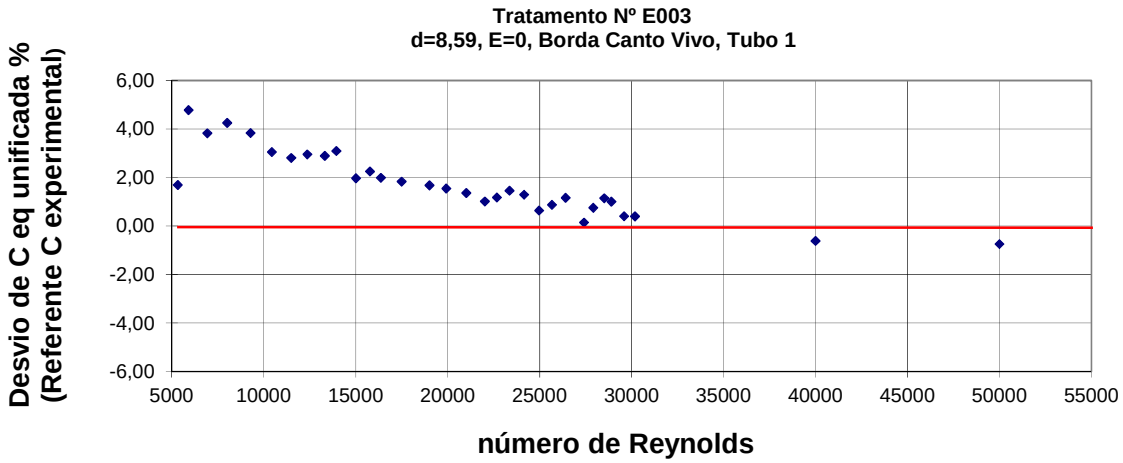


Figura 5.13: Desvio de C para equação unificada, para o Tratamento E003.

5.6 Generalização dos resultados

Neste ponto do trabalho é interessante a comparação dos resultados obtidos experimentalmente e os valores dos coeficientes de descarga encontrados na literatura. Para isso serão comparados, para o mesmo intervalo experimental, os tratamentos E001, E002 e E003, com as os resultados apresentados pela equação Reade Haris-Gallacher (RHG), que foi proposta em 1992 e consta na norma ISO 5167, 2003, Equações (3.17) e (3.18) do Capítulo 3 e as Equação (5.3) e Tabela 3.1 apresentadas por Miller (1996) referentes aos fabricantes: Rosemount e Foxboro, Figuras, 5.14 a 5.16

As Figuras 5.14 a 5.16 indicam uma proximidade dos coeficientes, mas existem desvios relativos que talvez justifiquem que cada fabricante desenvolva o seu próprio Coeficiente de Descarga *C*. Essas diferenças em *C* talvez se justifiquem por divergências geométricas de projeto em relação aos corpos do orifício integral, posição das tomadas de pressão e usinagem do orifício. No entanto, como sugestão, seria prudente que o presente caso fosse estudado mais detalhadamente e abrangido por um comitê normativo, como por exemplo a ISO

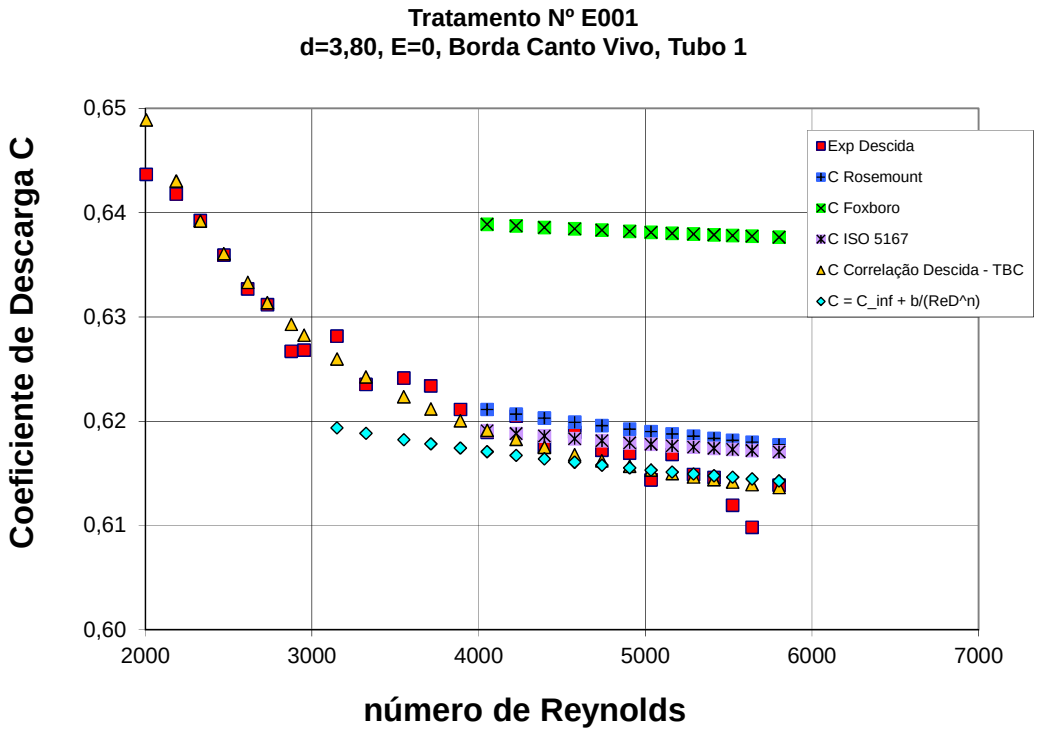


Figura 5.14: Comparativo de coeficientes para o tratamento E001.

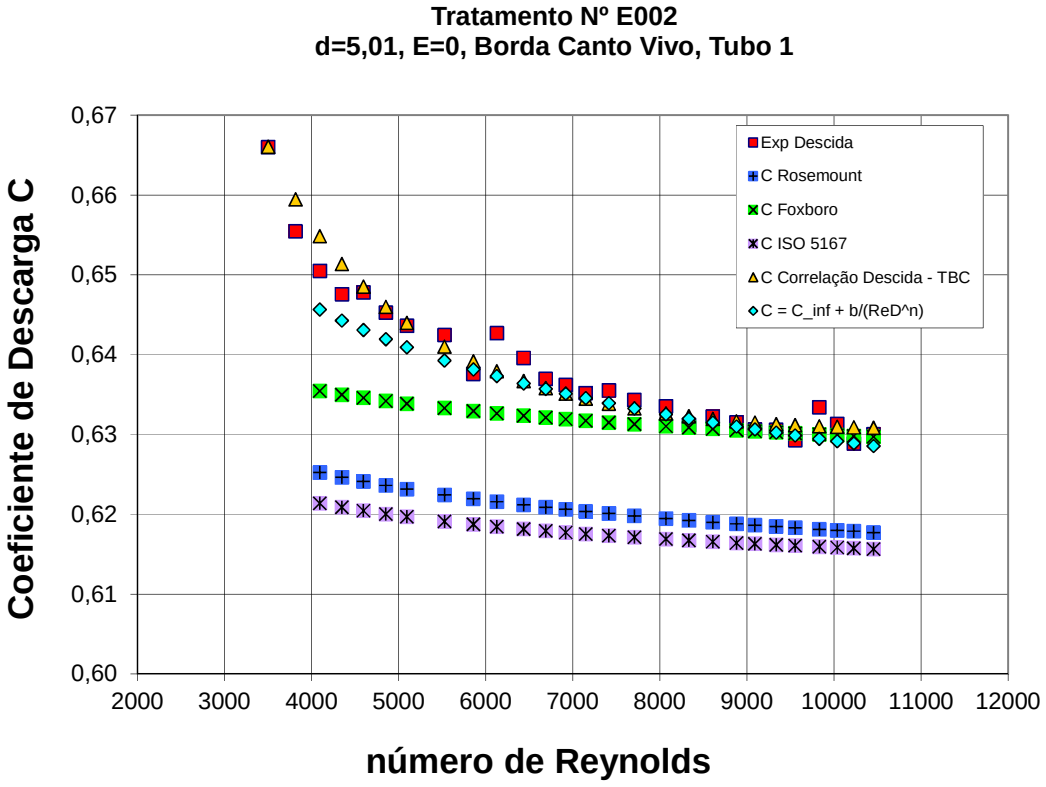


Figura 5.15: Comparativo de coeficientes para o tratamento E002.

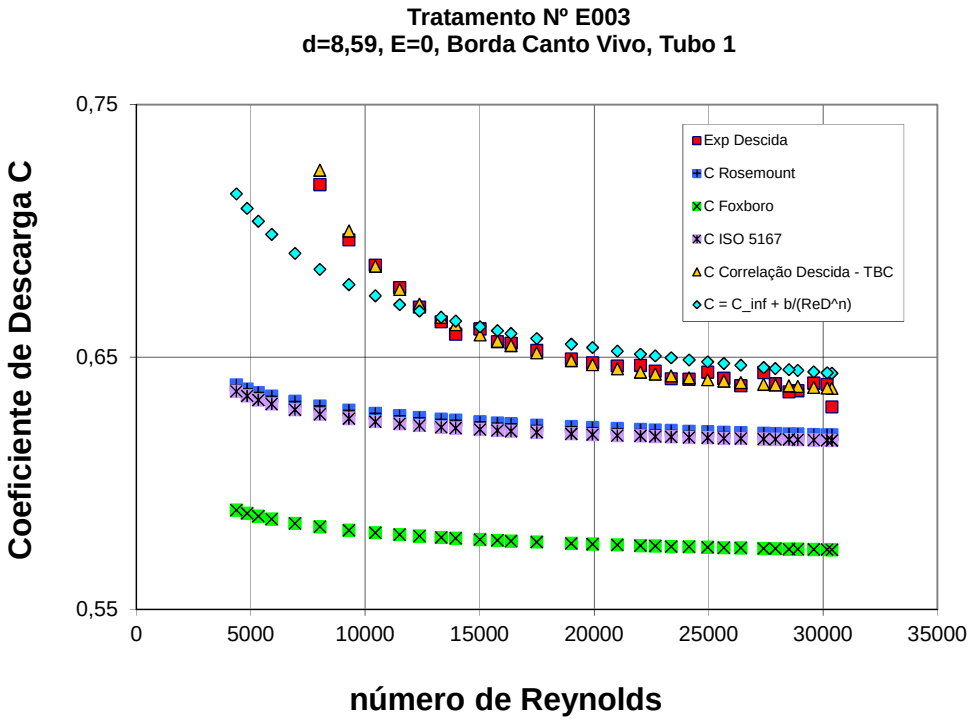


Figura 5.16: Comparativo de coeficientes para o tratamento E003.

As Figuras 5.17, a 5.19 são investigações sobre os cuidados relativos à fabricação, citados no capítulo 4, referentes aos tratamentos E031, E032 e E033.

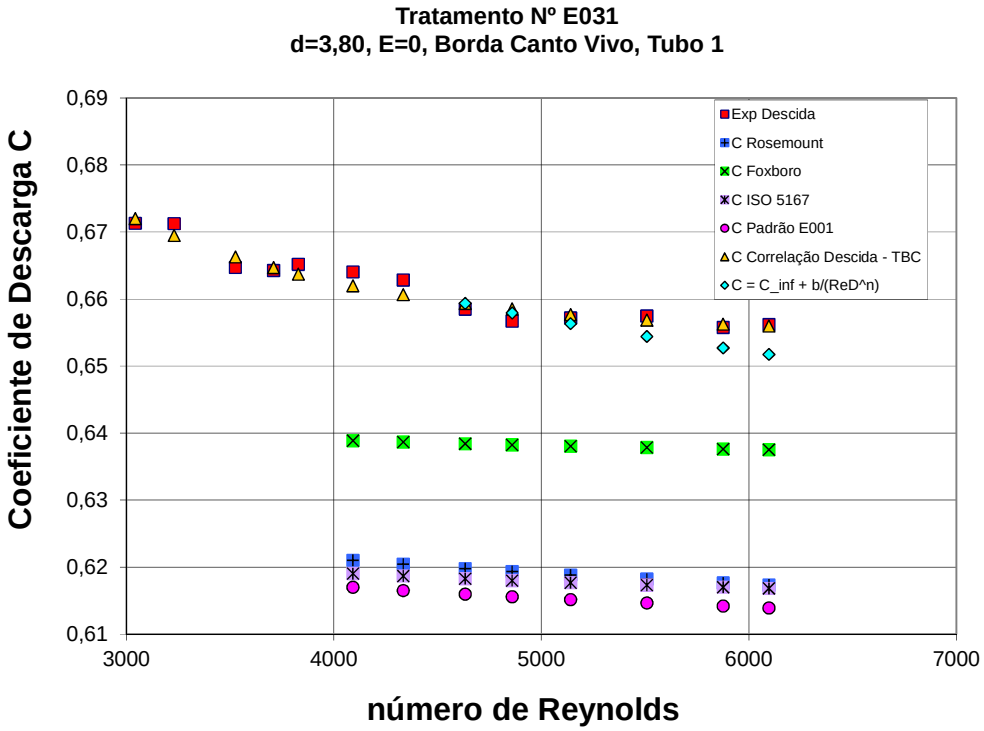


Figura 5.17: Comparativo de coeficientes para o tratamento E031.

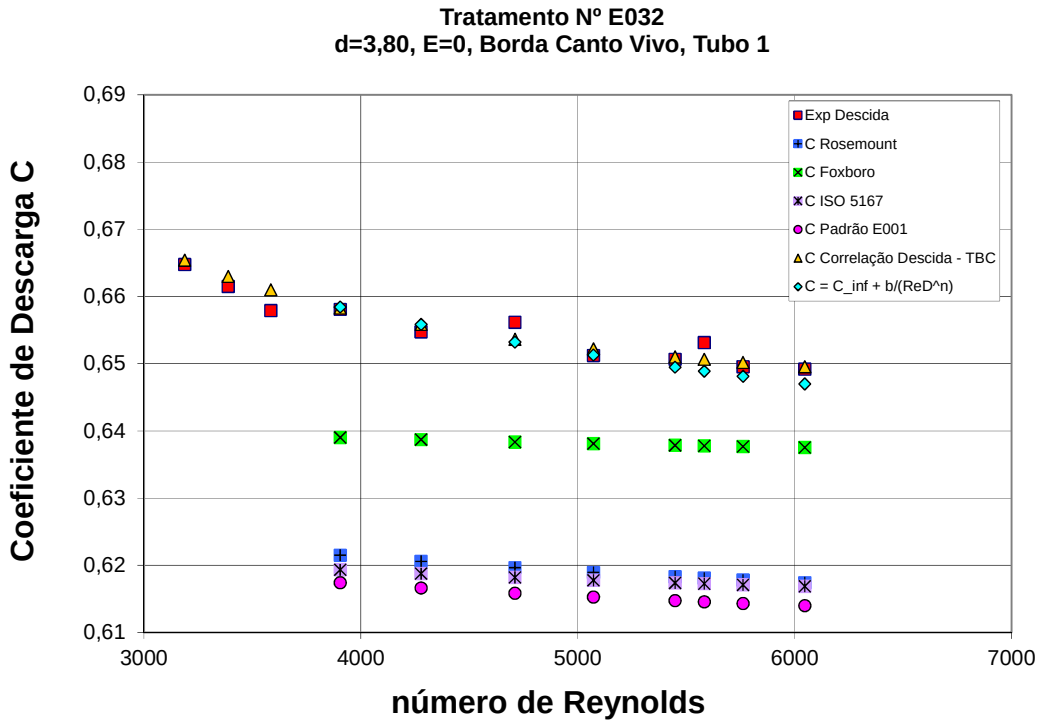


Figura 5.18: Comparativo de coeficientes para o tratamento E032.

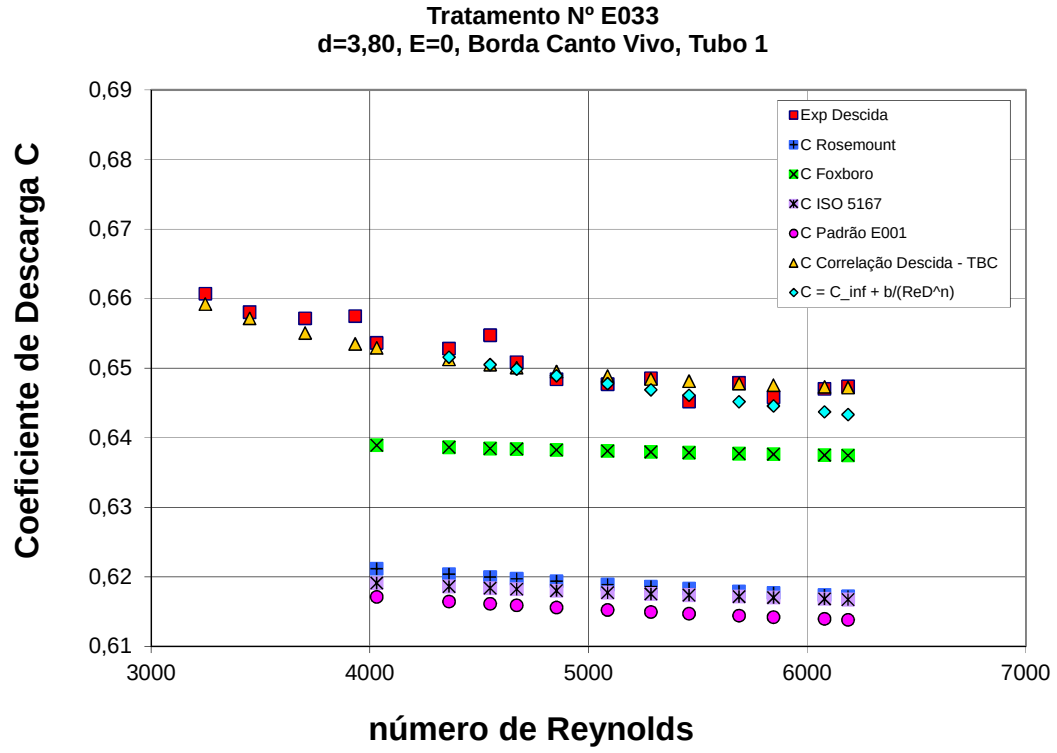


Figura 5.19: Comparativo de coeficientes para o tratamento E033.

Através de inspeção dimensional e análise visual, foram constatadas no orifício do Tratamento E031 que o furo do orifício estava 3% acima da medida máxima de fabricação e 1,8% acima da medida mínima de fabricação, além de apresentar uma rugosidade visual muito pior, quando comparada ao orifício do Tratamento E001, fabricado de acordo com exigências da norma ISA RP 3.2. No orifício do Tratamento E032 verificou-se que o furo do orifício estava 0,42% acima da media máxima de fabricação e dentro da medida mínima, e também tinha uma rugosidade visual muito pior comparada ao padrão E001. Já no tratamento E033, a parte dimensional foi idêntica ao tratamento E032, no entanto a rugosidade superficial ficou visualmente melhor. Como resultado mostrado nas figuras citadas, tem-se um desvio do coeficiente de descarga perceptível, quando comparada ao coeficiente do tratamento E001. Para um número de Reynolds fixo de 6.000, notam-se desvios relativos ao do Tratamento E001, sendo de 6,67%, 5,69% e 5,36%, respectivamente aos casos E031, E032 e E033. Isto indica a necessidade de cuidados gerais relativos à fabricação a fim de evitar desvios no coeficiente de descarga.

A seguir serão apresentados resultados, quantificando os efeitos das interferências causadas por diferentes rugosidades, formas de borda e diâmetros de orifícios integrais sobre a medição da vazão, fornecendo subsídios para que procedimentos adequados de medição possam ser estabelecidos (Figuras 5.20 a 5.22).

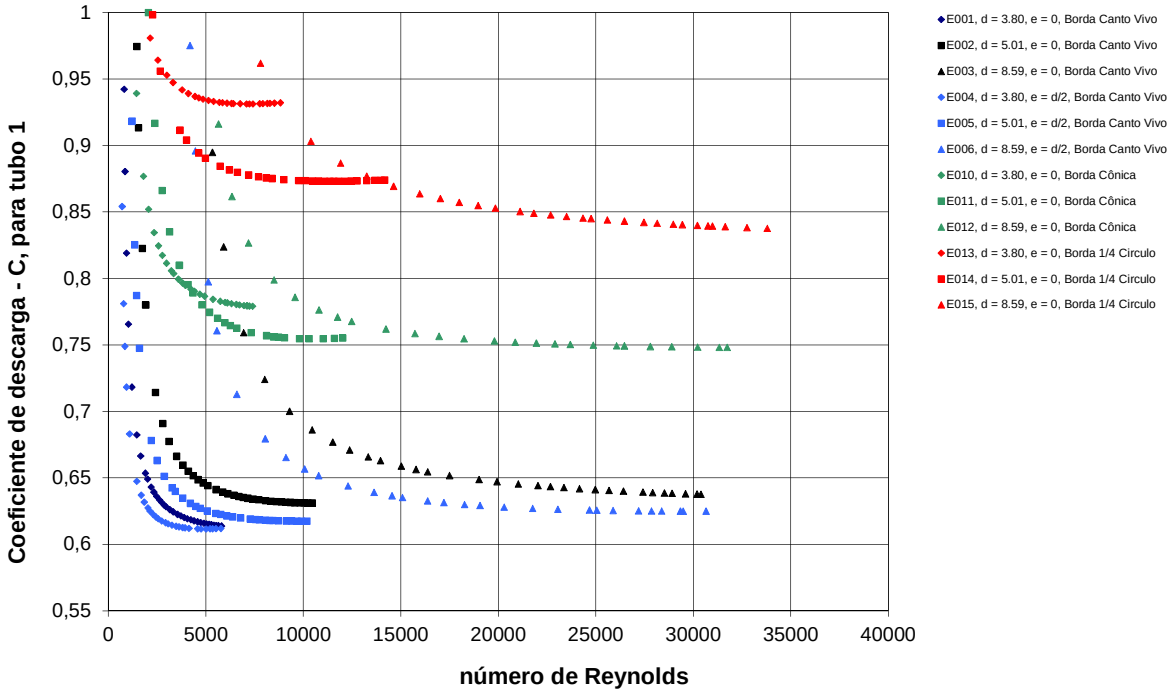


Figura 5.20: Resultado de *C* em função do número de Reynolds para o tubo 1.

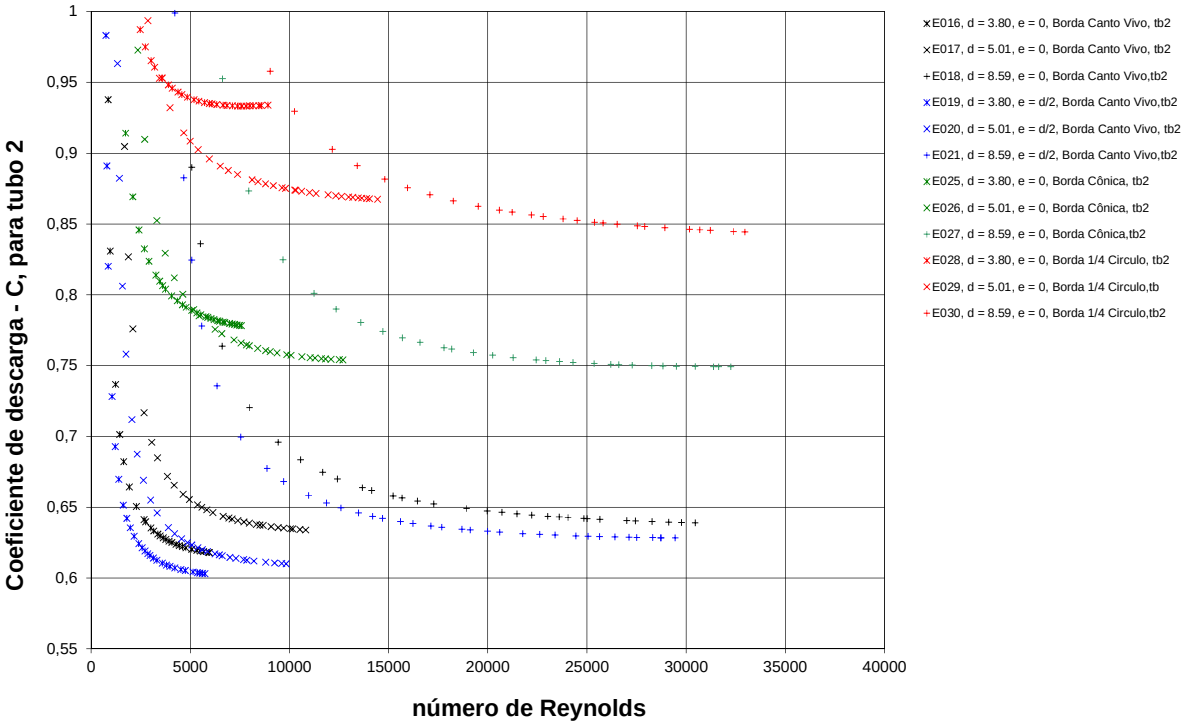


Figura 5.21: Resultado de *C* em função do número de Reynolds para o tubo 2.

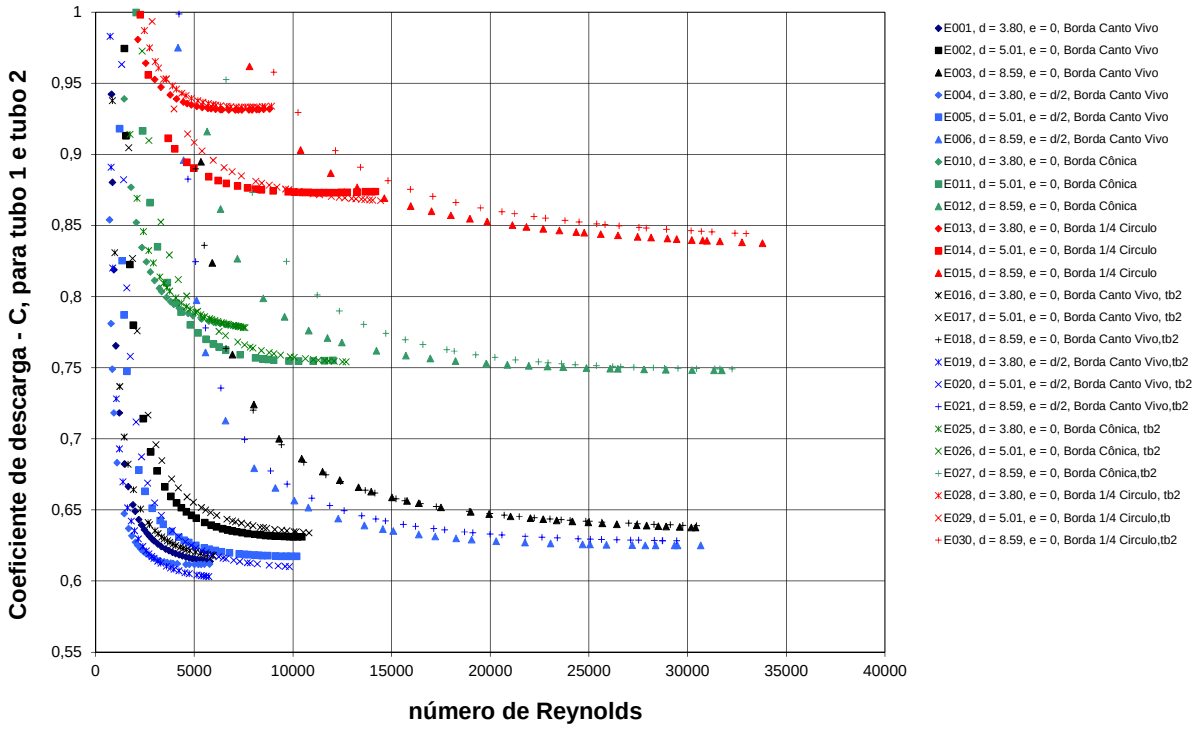


Figura 5.22: Resultado de *C* em função do número de Reynolds para os tubos 1 e 2.

Os resultados encontrados são de grande importância para os profissionais da área de engenharia que atuam na área de medição de vazão, pois muitos questionam e buscam informações a respeito dos orifícios integrais. Para alguns o orifício integral é comumente denominado de placa de orifício, o que é um equívoco, pois as placas de orifício foram normalizadas, enquanto os orifícios integrais não foram normalizados. Essas controvérsias justificam a execução deste estudo, bem como a continuidade desta linha de pesquisa.

Os Coeficientes de Descarga para número de Reynolds acima de 5000 podem ser concentrados nas regiões:

Região (1): 0,6 ≤ para *borda em canto vivo* ≤ 0,75;
Região (2): 0,7 ≤ para *borda cônica* ≤ 0,85;
Região (3): 0,8 ≤ *para borda ¼ de circulo* ≤ 1,00;

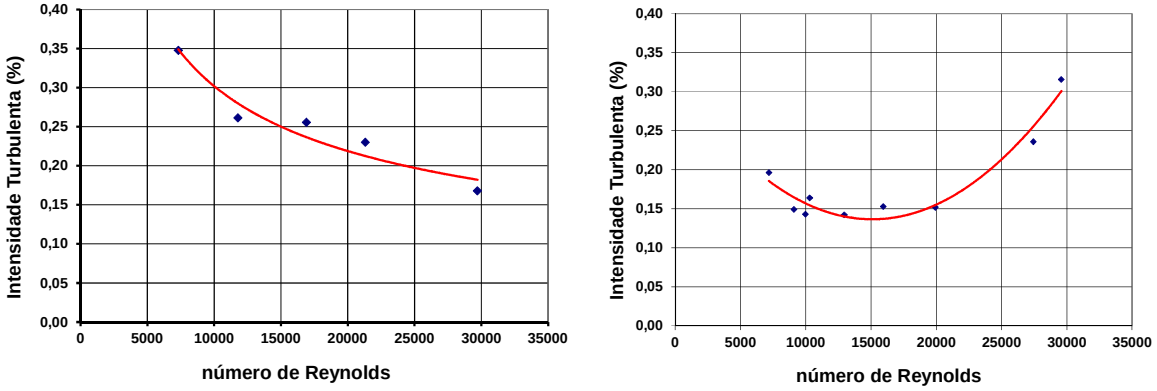
O aumento da excentricidade do furo do orifício tende a diminuir ou manter aproximadamente igual os valores de *C*, para um número de Reynolds fixo.

O aumento do diâmetro do orifício tende a aumentar ou manter aproximadamente igual os valores de *C*, exceto para as bordas Cônicas e ¼ de círculo.

As diferenças entre os resultados dos tubos lisos e rugosos são principalmente decorrentes dos efeitos da turbulência. Medidas com um anemômetro de fio quente, adequadamente posicionada a jusante da placa de orifício, indicam que a presença de ranhuras na interior da parede do tubo modifica substancialmente as condições de escoamento, em termos de nível de intensidade de turbulência, tal como mostrado na Figura 5.23. As medidas obtidas do anemômetro estão no Apêndice D.

Pode-se observar na Figura 5.23 que a intensidade turbulenta é decrescente com o aumento do número de Reynolds para o tubo 1(tubo liso) e que no tubo 2 (tubo rugoso) a intensidade turbulenta decresce até o número de Reynolds de 15000 e depois passa a crescer até chegar nas proximidades do número de Reynolds de 30000.

Comprando-se uma tubulação mais rugosa com uma menos rugosa, percebe-se, um acréscimo no coeficiente de descarga pelo menos até o número Reynolds de 5000 e tenderá a diminuir com o aumento do número de Reynolds. Essa indefinição também sugere mais investigações.



(a) Tubo 1: tubo liso. (b) Tubo 2: tubo rugoso.

Figura 5.23: Intensidade turbulenta do escoamento dentro de tubos *versus* número de Reynolds.

Capítulo 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

6.1 Conclusões

À guisa de conclusão, as seguintes observações extraídas da discussão dos resultados experimentais podem ser destacadas:

- Nota-se que os coeficientes de descarga para número de Reynolds acima de 5000 podem ser concentrados, nas regiões:

  Região (1): $0,6 \leq C$ para borda em canto vivo $\leq 0,75$;
  Região (2): $0,7 \leq C$ para borda cônica $\leq 0,85$;
  Região (3): $0,8 \leq C$ para borda ¼ de circulo $\leq 1,00$.

- Para um número de Reynolds fixo, os coeficientes *C* crescem de acordo com o tipo de borda:

  Canto Vivo < Cônica < ¼ de Círculo

- O aumento da excentricidade do furo do orifício tende a diminuir ou manter aproximadamente igual os valores de *C*, para um número de Reynolds fixo;

- O aumento do diâmetro do orifício tende a aumentar ou manter-se aproximadamente igual aos valores de *C*, exceto para as bordas cônicas e ¼ de círculo;

- Foi observado que placa de orifício com borda ¼ de círculo apresentou um Δp menor, comparada às demais bordas para um mesmo número de Reynolds, podendo ser classificadas em função da borda do orifício:

  Δp para ¼ de círculo < Δp para cônica < Δp para canto vivo;

- Os orifícios com borda em canto vivo possuem o coeficiente de descarga tendendo ao infinito com uma forte tendência de concentração em 0,6. Para as demais bordas o

coeficiente tende a se concentrar num ponto diferente. No entanto, no estudo não se conseguiu definir corretamente o ponto em comum;

- A utilização de placas abaixo de número de Reynolds de 5000 é possível desde que a faixa de utilização seja muito pequena ou quase pontual, uma vez que a alta variação do coeficiente de descarga neste intervalo infere em erros elevados. Devido a isto a maioria das normas e literatura não recomendam esta aplicação, pois *C* encontra-se dentro do intervalo de escoamento laminar e de transição;

- De modo geral, com uma rugosidade de tubulação maior, tem-se um acréscimo no coeficiente de descarga pelo menos até um número Reynolds de 5000 e tenderá a se igualar com números de Reynolds mais altos;

- A presença de ranhuras no interior da parede dos tubos modifica substancialmente as condições de escoamento;

- Através de comparação feita “in house”, notou-se que a falta de cuidados com as tolerâncias dimensionais e acabamento superficial, interferiram na determinação experimental do coeficiente de descarga;

- Comparações com outros valores, indicados por diferentes fabricantes ou valores normalizados, permitiram concluir que embora os coeficientes sejam muitos próximos uns dos outros, os orifícios integrais devem ser tratados a parte, até que padrões bem estabelecidos sejam adotados e normalizados;

- De modo geral, dentro do intervalo de observação, pode-se dizer que o orifício que melhor atende o perfil de um produto é o orifício com borda em canto vivo, pois apresenta melhores limites de números de Reynolds e um processo de fabricação mais simples e econômico.

6.2 Recomendações para futuros trabalhos

Devido à complexidade na montagem do experimento e durante a sua execução, dificilmente um estudo experimental sobre o assunto poderia abordar a totalidade de suas múltiplas facetas. Dessa forma, o presente trabalho concentrou sua maior atenção na quantificação e qualificação do coeficiente de descarga. Durante a realização dos ensaios experimentais e da análise e interpretação dos resultados obtidos, surgiram várias idéias para futuros trabalhos, as quais poderiam ser implementadas como uma extensão do estudo aqui desenvolvido. As mais pertinentes são apresentadas a seguir.

- A curto prazo:

- Ampliar a quantidade de orifícios, pois ajudaria no desenvolvimento das equações;

- Modificar o comprimento dos trechos retos a montante e jusante ao orifício, pois isto, segundo a literatura, influencia a incerteza dos coeficiente de vazão;

- Estudar outras formas de bordas de orifício, formas especiais;

- Estudar outros tipos de orifício, por exemplo o orifício segmental;

- A longo prazo:

- Ampliar a faixa do número de Reynolds, principalmente abaixo de 5000, o que implicaria na utilização de um transmissor de pressão diferencial com faixa de utilização menor, pois no presente trabalho os cálculos de incerteza mostraram um grande aumento nessa região;

- Variar os materiais dos tubos, para aprofundar o estudo da influência da rugosidade de tubos no comportamento do coeficiente de vazão;

- Variar os diâmetros dos tubos para 1 e 1 ½ polegadas, para o estudo da influência no coeficiente de descarga;

- Modificar a posição da tomadas de pressão ao longo da tubulação e comparar as interferências no coeficiente de descarga;

- Utilizar fluidos com bifásicos, pois fluidos nestas condições poderiam trazer mudanças no Coeficiente de Descarga;

- Utilizar gases como fluido de trabalho, pois fluidos em diferentes estados poderiam trazer mudanças no Coeficiente de Descarga;

- Avaliar a influência da variação de pressão e de temperatura na tubulação, pois alteram as propriedades físicas dos fluidos;

- Verificar o ponto de convergência dos coeficientes de descarga para um número de Reynolds Infinito;

- Avaliar a influência da viscosidade com a introdução de fluidos mais viscosos;

- Simular numericamente os resultados para comparar a experiência com a teoria;

Com o objetivo de aperfeiçoar a metodologia experimental utilizada, algumas modificações podem ser realizadas, entre as quais se destacam:

- Utilizar válvulas de controle automático para maior precisão na vazão;

- Utilizar sistema automático para pesagem e marcação do tempo da medida de vazão para calibração;

- Causar vibração na instalação experimental e pulsação do fluido;

- Utilizar sistema automático para medir a temperatura do fluido para cada vazão medida.

Referências

"ABB Instruction manual - integral orifice flow element with upstream & downstream piping and threaded connections - 1330L Series, Model A", 2006, Product Data Sheet IB-04H104_8. Catalog, Disponível em: http://www05.abb.com/global/scot/scot212.nsf/veritydisplay/c68747a7c0d4e175c1256bb3004cad0f/$file/ib-04h104_8.pdf, Acesso em: 20 de maio de 2012.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) - NBR-13225, 1994, "Mediação de vazão de fluidos em condutos forçados, utilizando placas de orifício e bocais em configurações especiais", Brasil.

Bassan, R.A., 2011, "Visualização Experimental de Escoamentos no Interior de Canais Munidos de Protuberâncias Parietais", Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, Ilha Solteira, 126 p.

Belyaev, B.M.; Patrikeev, V.G.; Lichko, A.A., 2001, "Comparasion of standards for calculating flow rate and amount with ISO standards", Measurements Techniques, Vol. 44, No. 11, pp. 1161-1165.

Belyaev, B.M.; Patrikeev, V.G.; Lichko, A.A., 2003, "Comparasion of the results of natural gas flow measurements in compliance with Russian and ISO standards", Measurements Techniques, Vol. 46, No. 10, pp. 954-962.

Bolton, W., 1996, "Instrumentation and measurement pocket book" 3th ed., Division of Reed Educational and Professional Publishing, Manchester.

Brokaw, R.S., 1961, "National Aeronautics and Space Administration, N.A.S.A" Technical Report R-81, 30 p.

Camapum Filho, N.A., 2007, "Avaliação de Medidores com Múltiplas Tomadas de Pressão na Macro Medição em Sistemas de Água", Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia – UNESP - Ilha Solteira, 128 p.

Delmée, G. J., 2004, "Curso Medição de Vazão de Gases e Líquidos", São Paulo: ISA, (Apostila ISA –4º Congresso Internacional de Automação, Sistemas e Instrumentação).

Delmée, G. J., 1983, “Manual de Medição de Vazão”, 2. ed., Edgard Blücher, São Paulo, 476 p.

Delmée, G. J., 2003, “Manual de Medição de Vazão” 3. ed., Edgard Blücher, São Paulo, 346 p.

Doebelin, E. O., 1990, “Measurement systems aplication and design” 4th ed., McGraw-Hill, California.

Fox, R.W. and McDonald, A.T., 1998, “Introdução à Mecânica dos Fluidos” 4. ed., LTC, Rio de Janeiro, 662 p.

ISA RP 3.2, 1960, “Flange Mounted Sharp Edged Orifice Plates for Flow Measurement” Pensilvânia.

ISO 5167-1, 2003, “Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices – Part 1”

Kline, S.J. and McClintock, F.A., 1953, “Describing uncertainties in single-sample experiments”, Mechanical Engineering, pp.3-8.

Lindquist, C., 2000, “Estudo Experimental do Escoamento ao Redor de Cilindros de Base Quadrada e Retangular”, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, Ilha Solteira, 188 p.

Martins, N., 1998, “Manual de Medição de Vazão: Através de Placas de Orifício, Bocais e Venturis”, Interciência: Petrobrás, Rio de Janeiro, 297 p.

Miller, R. W., 1996, “Flow Measurement Engineering Handbook” 3th. ed. McGraw-Hill, New York.

Moffat, R.J., 1982, “Contributions to the theory of single-sample uncertainty analysis” Journal of Fluids Engineering, Vol.104, pp.250-260.

Moffat, R.J., 1988, “Describing the uncertainties in experimental results”, Experimental Thermal and Fluid Science, No.1, pp.3-17.

Moffat, R.J., 1985, “Using uncertainty analysis in the planning of an experiment”, Journal of Fluids Engineering, Vol.107, pp.173-178.

Morris, A. S., 1993, “Principles of measurement and instrumentation.”, 2th.ed., Redwood Books, Great Britain.

Page, R.T., 1935, “Constant-flow orifice meters of low capacity”, Analytical Edition, pp. 355-358.

Reed, S.B. and Sprange, M.P.,1968, “Flowmeter calibrated for any gas in the range of 1 to 500 liters per hour”, I & EC Fundamentals, Vol.7, No.4, pp.651-655.

Romero, R.A., 2001, “Incertidumbre en la medición de flujo másico mediante una placa de orifício”, Centro Nacional de Metrologia (CENAM), México, pp. 84-96.

“Rosemount Integral Orifice Flowmeter Series - 1195”, 2008, Product Data Sheet 00813-0100-4686, Rev NA. Disponível em: http://www3.emersonprocess.com/rosemount/document/pds/1195.pdf, Acesso em: 20 de maio de 2012.

“Rosemount Integral Orifice Flowmeter Series, 1195, 3551SFP and 3095 MFP”, 2006, Product Data Sheet 00809-0100-4686, Rev HA. Catalog, Disponível em: http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Rosemount%20Documents/00809-0100-4686.pdf, Acesso em: 20 de maio de 2012.

“Rosemount The annubar flowmeter series – Product Data Sheet 00813-0100-4809” 2008, Rev FA.Catalog, Disponível em: http://www.pemit.cz/obrazy/3051SFA.pdf Acesso em: 20 de maio de 2012.

“Smar Manual de Instruções Operação e manutenção LD301”, 2008.

Streeter, V. L. and Wylie, E. B., 1990, “Mecânica dos Fluidos”, 7. ed., McGraw-Hill, São Paulo, 585 p.

Taira, N.M., 2003, “Treinamento em macro medição, conceitos e termos básicos da medição de vazão de fluidos”, IPT (Apostila IPT – Convênio IPT / Sabesp), São Paulo.

Wildhack, W.A.,1954, “Review of some methods of flow measurement”, Science, Vol. 120, pp. 191-197.

Apêndice A

GRUPOS DE MEDIDORES DE VAZÃO

A.1 Deprimogênios

Os medidores deprimogênios, em particular as placas de orifício, são um dos mais utilizados em todo mundo, devido seu alto grau de empregabilidade e baixo custo, comparados aos demais. Normalmente estes medidores são chamados de medidores primários, pois estão em contato direto com o fluido e são os primeiros elos dentro da malha de medição. Estes medidores são sempre acompanhados de um segundo elemento, o transmissor de pressão diferencial, comumente chamando de elemento secundário da malha (Figura A.1).



Figura A.1: Transmissor de pressão diferencial.

As leis que regem a medição com elementos deprimogênios são baseadas nas equações de Bernoulli, Equação (A.1), e da Continuidade, Equação (A.2), e corrigidas por coeficientes.

A Figura A.2 exemplifica o escoamento dentro de uma secção com estrangulamento e mostra as grandezas envolvidas equações de Bernoulli, Equação (A.1).

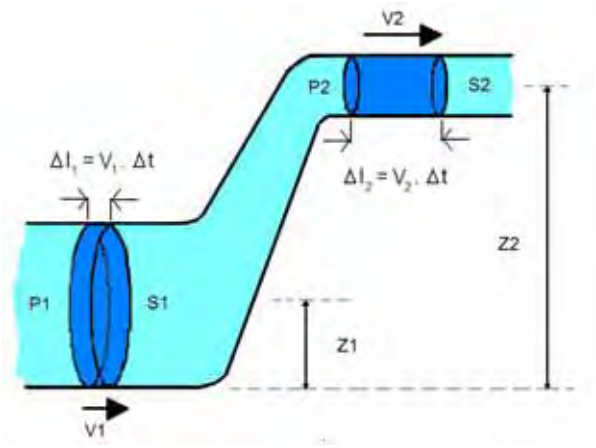


Figura A.2: Imagem de escoamento dentro de uma secção com estrangulamento.

A equação de Bernoulli pode ser escrita, como:

$$\frac{V_1^2}{2 \cdot g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 \qquad \text{(A.1)}$$

A equação da continuidade pode ser escrita:

$$V_1 \cdot S_1 = V_2 \cdot S_2 = Qteórica_{vol} \qquad \text{(A.2)}$$

A.1.1 Placas de orifício

As placas de orifício podem ser classificadas em concêntricas, excêntricas e segmentais (Figura A.3). Além disso, pode-se encontrar os seguintes tipos de borda: canto vivo (clássicas), ¼ de círculo (quadrantes), entrada cônica (Figuras A.4) e especiais. Normalmente, as placas de orifício são fabricadas em vários materiais resistentes a corrosão, sendo usualmente o aço inoxidável AISI 316, o material mais comum.

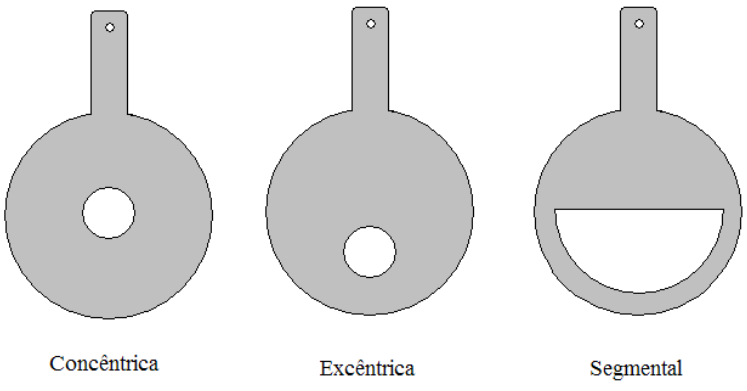


Figura A.3: Tipos de placas de orifício.

As principais normas utilizadas em medição de vazão para placas de orifício são NBR ISO 5167, ISO 5167 e AGA3 (Delmée, 2004). Estas normas definem parâmetros de aplicação, fabricação e cálculos.

Os parâmetros de aplicação estão relacionados aos principais tipos de montagem, como tomadas no flange (flange taps), tomadas em cantos (corner taps), tomadas em raios (radius taps). Além disso, estabelecem uma série de restrições, como limites de diâmetros de tubulações, de diâmetros de orifícios, de rugosidade de tubos, de números de Reynolds e de trechos retos a montante e jusante.

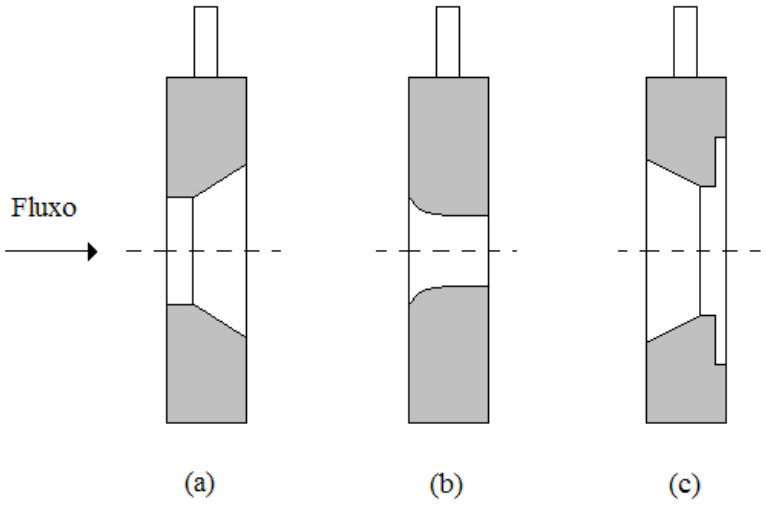


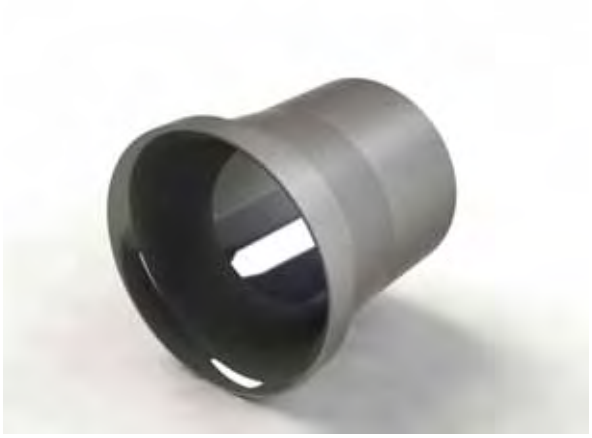
Figura A.4: Tipos de bordas: (a) canto vivo, (b) ¼ de circulo e (c) entrada cônica.

A.1.2 Bocais de vazão

Os bocais de vazão (Figura A.5) tiveram seu desenvolvimento no início do século XIX, mas só por volta de 1932 foram adotados pela norma ISA, posteriormente ISO. Por volta de 1934 a Norma ASME, através de pesquisas, recomendou um bocal com uma parte convergente com perfil elíptico. Uma diferença importante entre as duas normas está relacionada ao tipo de tomadas. Na Norma ISA, tem-se tomadas em canto e na Norma ASME tem-se tomadas em raios (D e ½ D).

Normalmente os bocais, comparados às placas de orifício, para uma mesma condição de pressão, temperatura e vazão, possuem uma pressão diferencial menor, consequentemente,

uma perda de carga também menor. Além disso, seu perfil aerodinâmico, comparado com o canto vivo de uma placa, contribui para um menor desgaste do elemento em velocidades elevadas.



http://www.flowmaster.com.br/index.php/produtos/index/bocais-de-vazao-1

Figura A.5: Bocal de vazão.

A.1.3 Venturis

Os venturis (Figura A.6), a exemplo dos bocais, possuem uma pressão diferencial menor, por isso são recomendados pela ISO 5167 quando a questão for a baixa perda de carga. De acordo com a ISO 5167, os tubos venturis podem ser fabricados de três maneiras: fundidos, usinados ou calandrados e soldados. A norma citada acima fornece detalhes para fabricação e montagem em tubulação para os três casos citados.



http://www.digitrol.com.br/produtos.php?cat=11&sub=94&prod=262

Figura A.6: Venturi calandrado e soldado.

A.1.4 Aerofólios

Os aerofólios não são elementos de vazão confiáveis e seu emprego não garante uma boa precisão, mas podem ser utilizados na malha de controle, quando se deseja um sinal representativo da vazão. Os aerofólios são utilizados para medição de vazão de ar quente de combustão em caldeiras e fornos industriais.

A.1.5 Tubo Pitot

O tubo Pitot (Figura A.7) foi inventado em 1732 pelo físico Henri Pitot para medir velocidades de líquidos. No entanto, o modelo foi aperfeiçoado e chamado de tubo de Prandtl, mesmo assim, em homenagem ao primeiro inventor o tubo é comumente chamado de tubo Pitot.

O tubo de Pitot original era bem rudimentar e compunha-se de um tubo de vidro curvado em ângulo reto, cujo ramal vertical era mantido fora d'água, enquanto o ramal horizontal, provido de um bocal em forma de funil, era inserido dentro da corrente d'água.

O instrumento tem como princípio de funcionamento o mesmo de um medidor de pressão diferencial, necessitando para isso, possuir duas pressões bem definidas. A primeira fonte de pressão do sistema é a pressão de impacto, pressão total, ou pressão de estagnação, tomada na extremidade frontal do tubo de Pitot. A segunda é a pressão estática somada à pressão dinâmica, podendo-se calcular a pressão dinâmica após verificar a pressão estática (Figura A.8).



Figura A.7: Tubo Prandtl ou tubo Pitot.

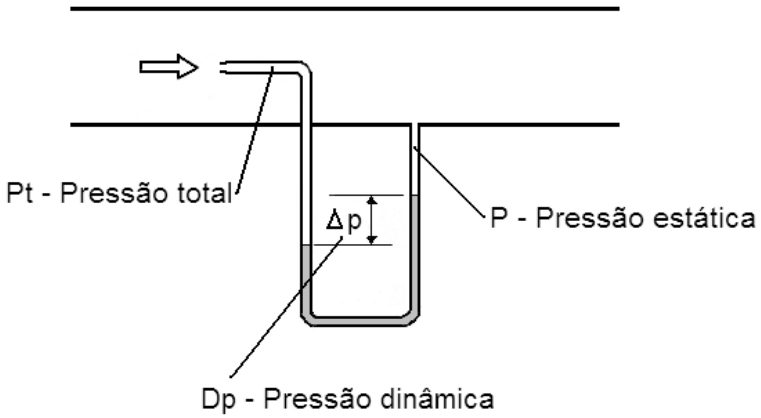


Figura A.8: Tubo Pitot original.

A diferença entre as pressões total e estática é demonstrada através das colunas de água que se formam no manômetro de tubo em "U" dos dados coletados. Os valores das velocidades do fluido para suas respectivas coroas (área de secção) são calculados através da Equação (A.3).

$$V_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot \Delta p}{\gamma}} \tag{A.3}$$

Sendo que Δp é a pressão diferencial (Pa), g é a aceleração gravitacional (m/s²), γ é o peso especifico do ar (N/m³), V_1 é a velocidade (m/s).

Em geral o tubo de Pitot é utilizado em áreas de fluxo laminar sem muita perturbação, e mede não somente a pressão do ar, mas de todos os possíveis fluidos.

A Figura A.9 esboça o exemplo de um tubo de Pitot que para medir a vazão de fluido que passa na secção de um tubo cilíndrico.

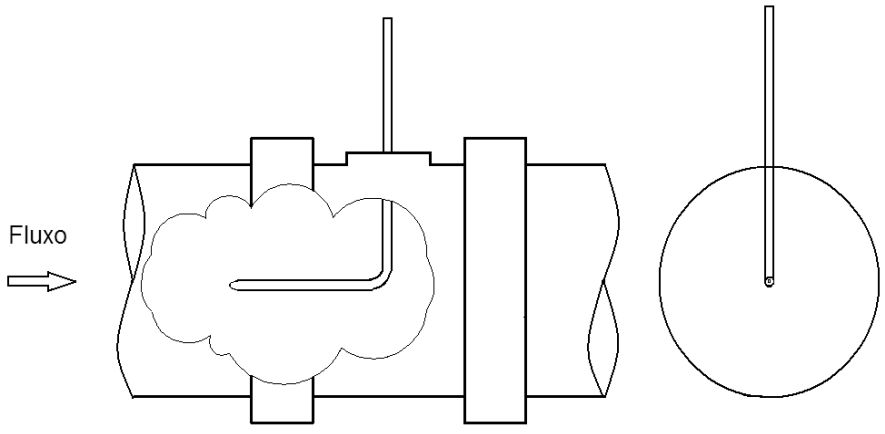


Figura A.9: Tubo Prandtl, ou tubo Pitot em tubulação.

A.1.6 Tubo pitot multifuros

Esses medidores, genericamente chamados de "*averaging Pitot*" na literatura internacional, utilizam várias tomadas de pressão distribuídas ao longo da seção transversal do tubo. Segundo Camapum Filho (2007), uma versão desses medidores muito conhecida é a comercializada pela empresa Rosemount sob a marca "*Annubar*". De acordo com Taira (2003) esses medidores também são conhecidos como "Sonda 4" e "Pitot proporcional", dentre outros (Figura A.10).

De acordo com Doebelin (1990), a câmara comum do equipamento proporciona uma pressão de impacto única, relacionada às pressões totais, e uma pressão estática também única. A raiz quadrada da diferença entre essas pressões pode ser relacionada por calibração com a vazão no tubo.

A presença do tubo de interpolação situado no interior da câmara única de pressão, empregado no medidor *Annubar* para capturar a pressão num ponto ótimo em relação às quatro tomadas de pressão. Devido a esse desconhecimento sobre a relação clara entre as pressões existentes e a pressão única medida, Morris (1993) considera que a sonda de múltiplas tomadas fornece apenas uma medição aproximada da vazão média do tubo, Figura A.11.



http://news.thomasnet.com/fullstory/Flowmeter-Series-uses-Annubar-primary-T-shaped-sensor-17043

Figura A.10: Tubo pitot multifuros (Rosemount, 2012)

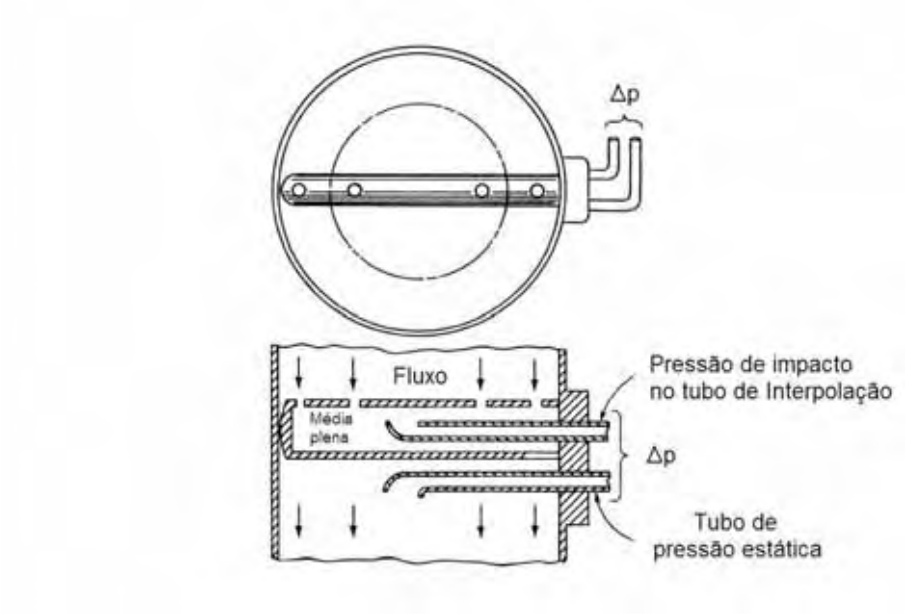


Figura A.11: Esquema dos medidores tipo Pitot Multifuros (adaptada de Doebelin, 1990)

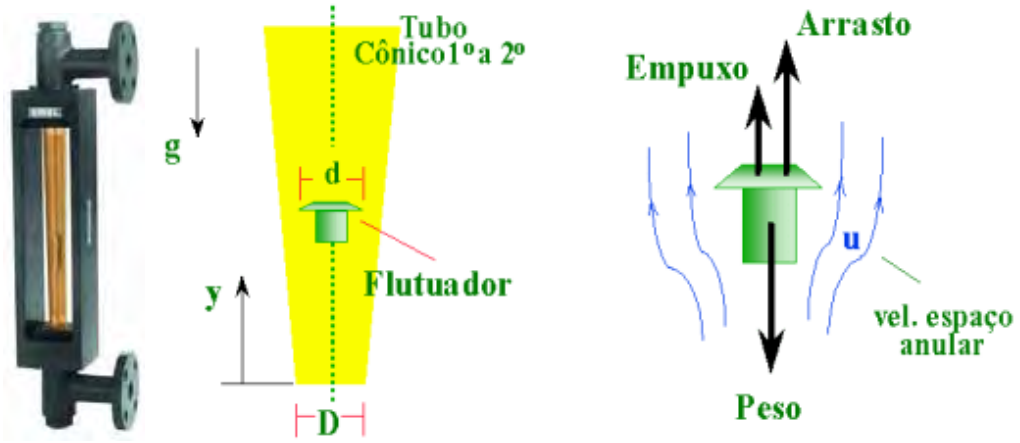
Segundo Taíra (2003), esses medidores têm vantagens e desvantagens. As vantagens são: baixo custo de instalação, baixa perda de carga, disponibilidade para diâmetros de 1” a 80” e possibilidade de operação com líquido, gás ou vapor de água. Suas desvantagens são: medidor altamente suscetível ao perfil de velocidades; exige trechos retos (>10 diâmetros a montante e > 5 diâmetros a jusante); exatidão pobre (da ordem de 2%); faixa útil de medição limitada; depende da qualidade da medida de pressão; perda de exatidão com o tempo (incrustações e risco de entupimento) e sensibilidade às variações de velocidade no perfil.

A.2 Lineares

Os medidores lineares são aqueles que produzem um sinal de saída diretamente proporcional à vazão. Os medidores deprimogênios divergem dos lineares, pois o sinal é quadrático em função da vazão.

A.2.1 Área variável

Os medidores de área variável apresentam uma exatidão modesta comparada à das placas de orifício. Estes tipos de medidores em particular os rotâmetros ocuparam uma parte considerável do mercado até os anos 1970 (Delmée, 1983). Estes instrumentos servem apenas para indicação local da vazão, no entanto podem ser providos de chave-limite de vazão para alarme ou alguma automação. A Figura A.12 mostra um rotâmetro e seu funcionamento.



http://www.logismarket.ind.br/omel/rotametro/1732608224-1763595422-p.html

Figura A.12: Rotâmetro

A.2.2 Medidores de efeito Coriolis

Delmée (1983) relaciona esse tipo de medidor à força de Coriolis, fundamentada pelo engenheiro e matemático Gaspard Coriolis. A Equação (A.4) mostra esta força e sua relação com a massa e as velocidades angulares e relativas de um determinado sistema.

$$\vec{f}_c = 2 \cdot m \cdot \vec{\omega} \times \vec{v}_r \qquad \text{(A.4)}$$

Sendo $\vec{f}_c$ é a força de Coriolis (kgf), *m* é a massa (kg), $\vec{\omega}$ é a velocidade angular (radianos/s) e $\vec{v}_r$ é a velocidade relativa (m/s).

Quando uma determinada massa de fluido com velocidade percorre uma seção em um sistema, ao ser excitada por um movimento oscilatório em torno do eixo de rotação será notada a força de Coriolis, a qual é contrária ao movimento angular, como demonstrado na Figura A.13.

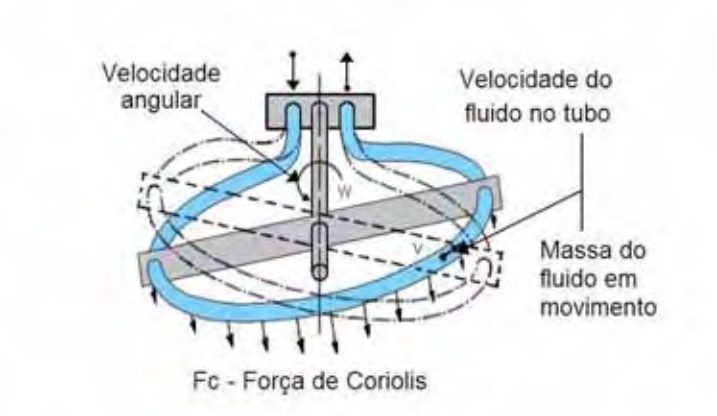


Figura A.13: Força de Coriolis em medidores (adaptada de Micro Motion, 2007).

Os medidores de vazão baseados no princípio de Coriolis são conhecidos como medidores mássicos de Coriolis (Figuras A.14 e A.15), e segundo Delmée (2003), o angulo θ é medido por sensores de proximidade de precisão, cujos sinais, depois de um condicionamento, permitem obter uma tensão proporcional à vazão mássica, conforme a Equação (A.5).

$$Qreal_{mássica} = \frac{kp \cdot \theta t}{2 \cdot \varpi \cdot Lt \cdot da} \tag{A.5}$$

Sendo $Qreal_m$ é a vazão real mássica (kg/s), *kp* é a constante de proporcionalidade, θt é o ângulo de torção (radianos), $\vec{\varpi}$ é a velocidade angular (Hz), *Lt* é o comprimento do tubo (m) e *da* é o afastamento do tubo (m).

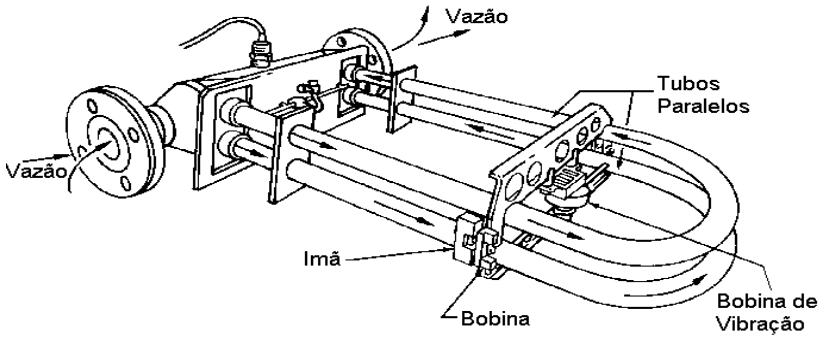


Figura A.14: Partes do medidor de vazão por efeito Coriolis (adaptada de Micro Motion, 2007).



http://www.interempresas.net/Electricidad_Electronica/Articulos/32325-Emerson-amplia-su-gama-de-medidores-Coriolis-de-alta-capacidad-Micro-Motion.html

Figura A.15: Medidor de vazão por efeito Coriolis.

A.2.3 Eletromagnéticos

Os medidores eletromagnéticos ou magnéticos (Figura A.16) são fabricados baseados na lei de Farady. Segundo Delmée (1983), quando o fluido em movimento atravessa a seção de medição onde o campo magnético está presente, produz uma força eletromotriz, que pode ser medida por eletrodos e pode ser relacionada com a vazão volumétrica (Figura A.17), através da Equação (A.6).

$$Qteorica_{vol} = \frac{U \cdot \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot De}{B} \tag{A.6}$$

Sendo $Qteórica_{vol}$ é a vazão volumétrica (m^3/s), U é a tensão (volts), De é a distância entre os eletrodos (m) e B é a densidade de fluxo magnético (Tesla).

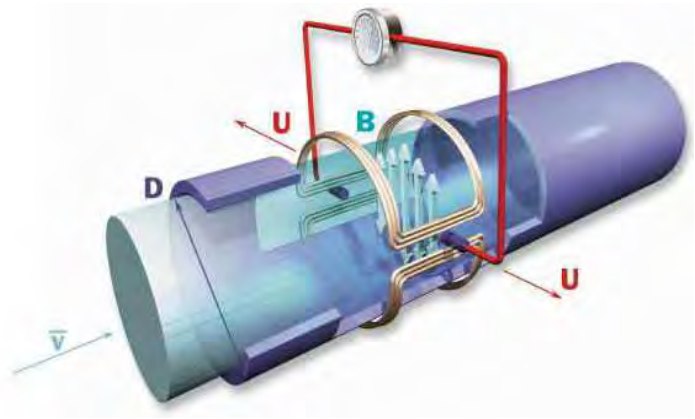


Figura A.16: Funcionamento do medidor magnético (Taira, 2003).



Figura A.17: Medidor magnético (Krohne, 2009).

Para um perfeito funcionamento destes medidores, devem-se ter fluidos condutores de eletricidade, indicados principalmente para líquidos condutores de eletricidade, como ácidos e outros produtos químicos corrosivos, desde que as partes internas tenham materiais apropriados.

Derivados de petróleo normalmente são exclusos desta aplicação, por estarem abaixo do limite prático de condutividade, assim como os gases, a menos que sejam ionizados. A viscosidade do fluido não impede uma boa medição nestes equipamentos, podendo medir fluidos newtonianos e não newtonianos.

A.2.4 Térmicos

Os medidores térmicos estão divididos em dois tipos, os que medem escoamento laminar e os que medem escoamento turbulentos. Baseados no princípio de funcionamento por equilíbrio térmico, condicionados pela velocidade do fluido no escoamento. Esses medidores são especilamente projetados para medir vazaõ gases secos e limpos, mas alguns podem medir vazão de líquidos. Pode-se citar os anemômetros a fio quente, filme quente, fio quente tridimencional, etc.

Podem ser aplicados nos seguintes processos: biogás, digestores, ar de combustão, dutos de fumaça/chaminés, ventilação de minas, monitoramento de emissão orgânicas e gás natural. Em gases úmidos e sujos não é aconselhável sua utilização.

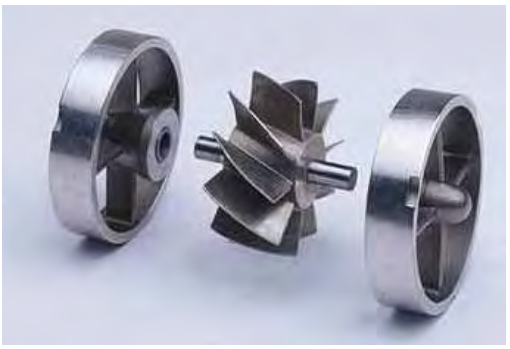
A.2.5 Turbinas

O emprego de rotores (Figura A.18) para medição de vazão é empregada para medir fluxos de líquidos e gases. As pás dos rotores (turbinas) giram quando um fluxo passa por elas, gerando uma velocidade angular devido a passagem do fluido. Em condições reais esta velocidade sofre interferências viscosas e do atrito dos mancais, ocasionando uma diferença entre a velocidade angular teórica e a real chamada de escorregamento, ocasionado um conjugado de carga.

O maior problema das turbinas para líquidos e gases é justamente o efeito causado pelos conjugados resistivos e regras rígidas são estabalecidas pela ISO e a OIML para uma melhor exatidão do equipamento.

A detecção do giro das turbinas pode ser mecâmica ou eletrônica. A detecção mecânica é feita com auxílo de um redutor de engrenagens e um totalizador mecânico e a detecção eletrônica pode ser magnética ou por radiofrequência.

Os rotores podem estar dispostos axialmente, radialmente (Figura A.19) ou tangencialmente (Figura A.20). Normalmente os sitemas de mancais para turbinas para líquidos são do tipo encosto, onde o eixo da turbina é apoiado, e para as turbinas de gases tem-se mancais de rolamentos de esferas. De modo geral as turbinas apresentam boa exatidão e são utilizadas há várias décadas para medição de vazão e transferências comerciais.



http://www.proemed.com.br/servicos.asp

Figura A.18: Rotor radial



http://www.proemed.com.br/servicos.asp

Figura A.19: Medidor de vazão turbina. .



Figura A.20: Micro turbina, com rotor tangêncial (Kobold, 2008)

A.2.6 Ultra-sônicos

Os medidores (Figura A.21) que utilizam a tecnologia do ultra-som são aplicados desde 1960, mas só por volta de 1980 atingiram um patamar comercial e tecnológico. Segundo Delmée (2003), o ultra-som apresenta características interessantes, como o fato de dirigir o feixe ulta-sônico como um feixe de luz, o qual é sujeito ao fenômeno de refração, ao passar de um meio para outro, e de reflexão total.



http://portuguese.alibaba.com/product-gs/krohne-ultrasonic-flowmeter-281938279.html

Figura A.21: Medidor ultra-sônico (Krohne, 2012)

De acordo com a bibliografia de instrumentação (Delmée, 1983; Doebelin, 1990; Morris, 1993; Bolton, 1996) entre as muitas técnicas de medição por ultra-som, duas são as difundidas na indústria: o efeito Doppler e o tempo de trânsito. O efeito Doppler ocorre quando o feixe é refletido por partículas ou bolhas, gerando uma frequência proporcional à velocidade das partículas no fluido, e esta frequência será maior quando a direção do feixe percorrer o sentido contrário ao das partículas e será menor se o sentido for o mesmo (Figura A.22). O tempo de trânsito, por sua vez, baseia-se na diferença de tempo que um feixe inclinado demora para percorrer o percurso de ida e volta, comparativamente a velocidade do som no meio (Figura A.23).

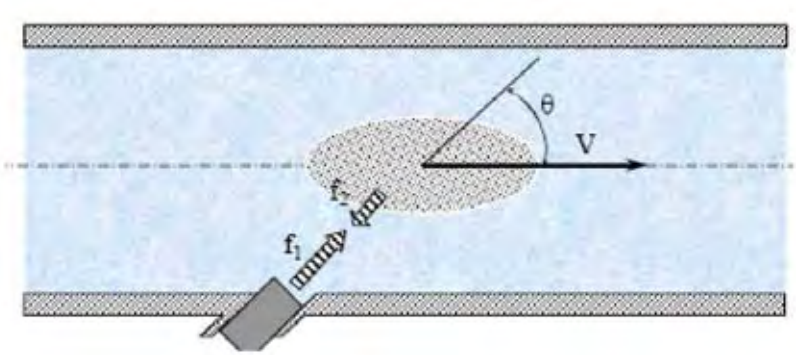


Figura A.22: Esquema de funcionamento, baseado no efeito Doppler (Taira, 2003).

Para o medidor ultra-sônico baseado no efeito Doppler a velocidade média pode ser calculada pela Equação (A.7):

$$V = \frac{c_s \cdot (f_1 - f_2)}{2 \cdot f_1 \cdot \cos\theta} \tag{A.7}$$

sendo V é a velocidade média (m/s), C_s é a velocidade do som no meio (m/s), f_1 é a freqüência emitida pelos transdutores (Hz), f_2 é a freqüência refletida (Hz) e θ é a ângulo de reflexão (radianos).

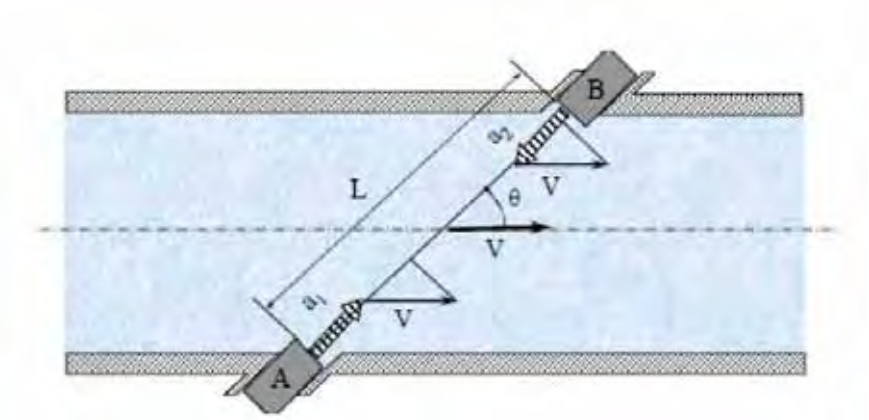


Figura A.23: Esquema de funcionamento, baseado no tempo de trânsito (Taira, 2003).

Para o medidor ultra-sônico baseado no tempo de trânsito a velocidade média ao longo de L pode ser calculada pela Equação (A.8):

$$V = \frac{{L_{ab}}^2}{2 \cdot d_{ab}} \left(\frac{1}{t_{ab}} - \frac{1}{t_{ba}} \right) \tag{A.8}$$

sendo V é a velocidade média (m/s), L_{ab} é o percurso entre os dois transdutores (m), d_{ab} é a distância entre as secções retas que passam pelos dois transdutores (m), t_{ab} é o tempo que o ultra-som leva para percorrer a distância de A até B (s) e t_{ba} é o tempo que o ultra-som leva para percorrer a distância de B até A (s).

No entanto, para o cálculo da vazão utiliza-se um fator K_{UF} para corrigir a velocidade acima descrita, que é a velocidade integral ao longo do percurso L e não a velocidade média, portanto, representada pela a Equação (A.9).

$$Qreal_{vol} = K_{UF} \cdot V \cdot S \tag{A.9}$$

sendo $Qreal_{vol}$ a vazão volumétrica (m^3/s), V é a velocidade (m/s), K_{UF} é a função do perfil de velocidades (adimensional) e S é a secção de área do tubo (m^2).

Estes medidores são largamente usados para levantamentos em campo, muito comuns na Europa em redes públicas de água e esgoto. Na insdústria petroquímica em redes de oleodutos e gás natural, também são encontrados. Embora esses medidores apresentem boa precisão também repressentam maiores custos.

A.2.7 Vórtices

Os Medidores tipo Vórtices (Figura A.24) estão fundamentados na formação de uma esteira de vórtices alternados à jusante a um obstáculo de perfil não-aerodinâmico, com frequência proporcional a velocidade do escoamento, como sugerido na Figura A.25.



http://www.cacheuk.com/cgi-bin/cache.cgi?Command=ShowProduct&db_pid=19

Figura A.24: Medidor de vórtices.

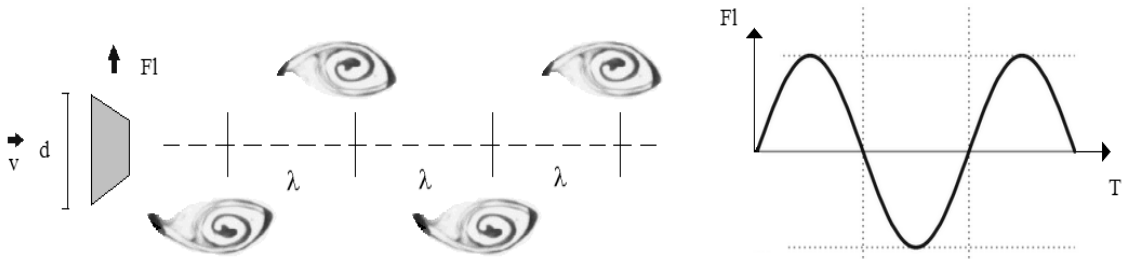


Figura A.25: Esquema de formação de vórtices.

O número de Stouhal (*St*) é uma constante usada para o fenômeno oscilatório e também se aplica à frequência (*f*) de sucessão dos vórtices, que ocorre num medidor com dimensão *D* do anteparo e a velocidade V do fluido (Equação A.10).

$$St = \frac{f \cdot Da}{V} \tag{A.10}$$

sendo St é o número de Strouhal (adimensional), V é a velocidade (m/s), Da é a dimensão do anteparo, também chamado de “shedder” (m) e f é a freqüência de emissão de vórtices (Hz).

Multiplicando-se a velocidade pela área da secção tem-se a vazão teórica do medidor, no entanto, a partir de um determinado número de Reynolds para cada forma do anteparo existirá um fator *K* de proporcionalidade entre a frequência constante e a vazão real, ou seja, o fator de calibração do equipamento.

A.2.8 Especiais

Os medidores especiais são aqueles cujo conjunto elemento primário/transmissor só é utilizado em casos especiais. Entre os medidores especiais destacam-se: medidores de força, medidores de correlação, medidores a laser, medidores hidricos, medidores de escoamento multifásicos.

A.3 Volumétricos

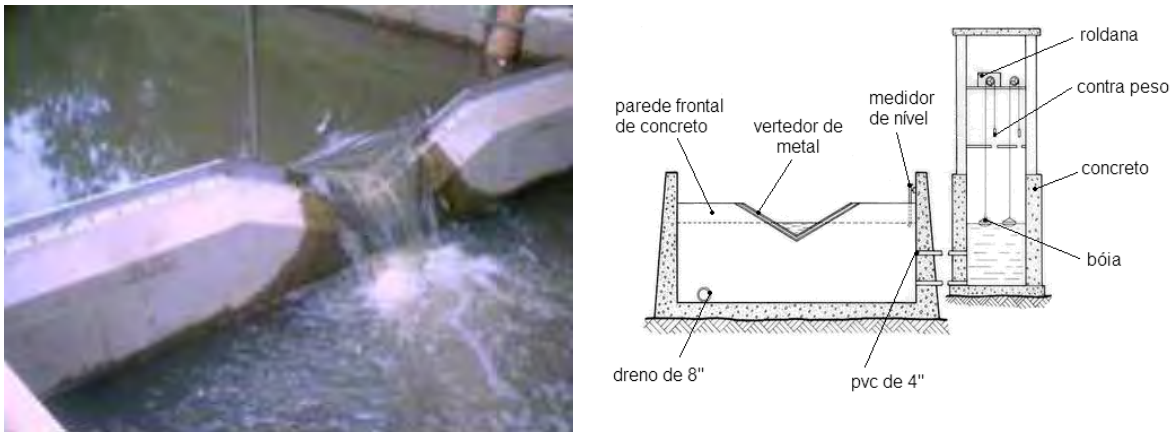
Estes medidores são conhecidos como medidores de deslocamento positivo, tendo a função de medir volumes em litros ou metros cúbicos, ao invés da vazão. A vazão pode ser calculada, por meio de acessórios mecânicos ou eletrônicos de forma contínua, derivando matematicamante o volume pelo tempo. São exemplos de medidores volumétricos: medidores com diafragmas, medidores com disco de mutação, medidores de palhetas, medidores de pistão oscilante, medidores de pistões recíprocos, medidores de rotor, medidores de engrenagens, medidores de semi-imersão.

A.4 Medidores de canais abertos

Como o próprio nome induz, estes medidores são direferentes dos até aqui discutidos, pois possuem canais abertos, e ao contrário dos demais, sua medição se faz através da

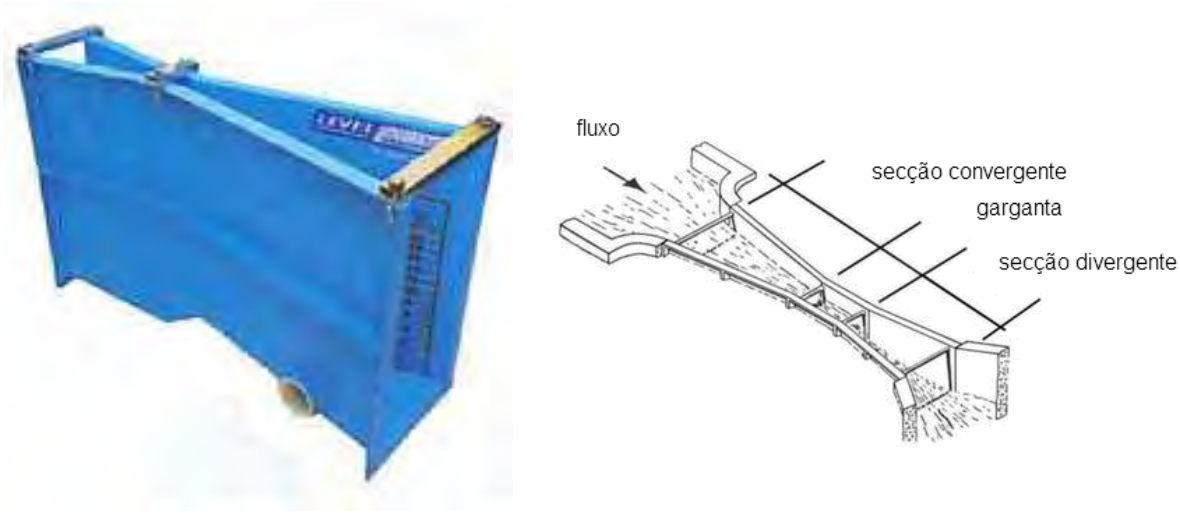
medição do nível do fluido ao passar pelo canal do medidor. Segundo Delmée (2003), neste tipo de medidor o nível do fluido pode ser quantificado com um transmissor de nível tipo bóia ou capacitivo, com registro, com pressão diferencial, com medidor ultra-sônico, etc. O medidor de canal aberto é provido de um sistema eletrônico que calcula a equação da vazão e integra seu valor ao longo do tempo.

Entre estes medidores podem-se citar os Vertedouros (Figura A.26), a Calha Parshall (Figura A.27) e a Calha de Palmer-Browlus.



http://www.avix.com.br/mediccedilatildeo-de-vazotildees.html

Figura A.26: Vertedouros triangulares.



http://www.avix.com.br/mediccedilatildeo-de-vazotildees.html

Figura A.27: Calha Parshall.

Apêndice B

ANÁLISES DE INCERTEZAS

B.1 Introdução

O objetivo de se estabelecer a análise de incerteza de uma medição ou resultado experimental é permitir que se faça a melhor estimativa possível de uma faixa de valores dentro da qual o valor verdadeiro deve estar com uma determinada probabilidade.

Todos os resultados até aqui apresentados foram para os experimentos E001 (d =3,80 mm), E002 (d =5,01 mm) e E003 (d =8,59 mm), com furos concêntricos, bordas em canto vivo e tubo 1, pois foram os experimentos padrões para comparação com outras literaturas e com os demais tratamentos deste estudo.

B.2 Análise de incerteza por amostragem simples

Segundo Lindquist (2000), os experimentos de amostragem simples são aqueles em que cada ponto experimental é testado uma vez, ou no máximo algumas poucas vezes. Experimentos de pesquisa em mecânica dos fluidos e transferência de calor são geralmente experimentos de amostragem simples e caracterizados por dados distribuídos ao longo de uma ampla faixa do parâmetro em estudo (Moffat, 1988)

A análise de incerteza por amostragem simples pode ser encontrada na literatura nos trabalhos de Kline e Mcclintock (1953) e Moffat (1982, 1985 e 1988). Além de sua utilidade mais visível, a descrição da incerteza de um resultado em um estudo geralmente é muito útil como ferramenta de diagnóstico de previsão, tanto na fase de planejamento como de execução de um experimento.

B.2.2 Principais erros

Segundo Martins (1998), as Incertezas de uma medição são causadas por quatro tipos básicos de erros:

- Erros espúrios;

- Erros aleatórios;
- Erros sistemáticos constantes;
- Erros sistemáticos variáveis.

Erros espúrios são causados por enganos ou defeitos evidentes, tais como a anotação incorreta de um valor, ou o ponteiro solto de um instrumento. Os resultados associados com estes erros devem ser abandonados após um esforço razoável para identificar as suas causas.

Erros aleatórios são aqueles que causam as diferenças entre medições sucessivas de uma grandeza constante.

Erros sistemáticos constantes são aqueles que não variam quando são feitas medições sob as mesmas condições. Não variam com o tempo, mas podem variar com o valor da medição. Por exemplo, um ajuste incorreto no "zero" de um instrumento causa um erro sistemático constante igual para todas as leituras. Já um ajuste de "span" de um instrumento causa um erro sistemático constante que varia com o valor da leitura.

Erros sistemáticos variáveis são aqueles que variam com o tempo e são causados, por exemplo, pelo desgaste do canto vivo de uma placa de orifício, ou pela variação da calibração de um instrumento em função da variação da temperatura ambiente.

B.2.3 Fundamentos matemáticos

Considerando-se uma variável X_i que possui uma incerteza conhecida δX_i, a maneira de representar a variável e sua incerteza é:

$$X_i = X_i(medido) \pm \delta X_i \qquad \text{(B.1)}$$

Esta definição deve ser interpretada no seguinte sentido:

- A melhor estimativa de X_i é X_i (medido)
- Existe uma incerteza em X_i que pode ser tão grande quanto $\pm \delta X_i$
- As chances da incerteza de X_i ser maior do que $\pm \delta X_i$ são de 20 para 1 (5%)

O valor de X_i (medido) representa a leitura realizada, enquanto que δX_i representa 2σ, sendo que σ é o desvio padrão da população de possíveis medidas das quais a única amostra X_i foi tirada (Moffat, 1988). A Equação (B.1) segue da hipótese de que se um número infinito de observações fosse feito, a média seria o valor verdadeiro (assumindo que não existem erros

sistemáticos ou fixos) e os erros aleatórios seriam normalmente distribuídos ao seu redor, com desvio padrão igual a σ. Uma vez que 95% de todos os elementos de uma população situam-se dentro do intervalo ± 2σ em torno da média, pode-se dizer com 95% de confiança que o valor médio deve estar contido no intervalo de ± 2σ do valor medido.

Para o caso de experimentos com amostragem simples, a determinação de σ exige a realização de um experimento auxiliar para estimar a componente aleatória da incerteza. Este experimento auxiliar geralmente consiste na obtenção de um conjunto de observações independentes do processo numa condição de ensaio representativa, geralmente um conjunto de 30 observações. O desvio padrão da população (σ) pode então ser calculado a partir do desvio padrão da amostra (S) obtido do experimento auxiliar, utilizando-se a distribuição de Student.

O resultado R do experimento, calculado a partir de um conjunto de medições, é representado por:

$$R = R(X_1, X_2, X_3, ..., X_n) \tag{B.2}$$

Kline e McClintock (1953) mostraram que a incerteza de um resultado calculado pode ser estimada com boa precisão utilizando uma combinação dos efeitos das incertezas individuais de cada variável sobre o resultado. O efeito da incerteza de uma única variável sobre o resultado calculado, se somente esta variável possui uma incerteza associada, é dada por:

$$\delta R_{X_i} = \frac{\partial R}{\partial X_i} \cdot \delta X_i \tag{B.3}$$

A derivada parcial de R em relação a X_i é conhecida como o *coeficiente de sensibilidade* do resultado R em relação à variável X_i. Quando diversas variáveis independentes são utilizadas no cálculo do resultado, os termos individuais são combinados da seguinte forma:

$$\delta R = \left[\sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial R}{\partial X_i} \cdot \delta X_i \right)^2 \right]^{1/2} \tag{B.4}$$

Essa é a equação básica da análise de incertezas, onde cada termo representa a contribuição feita pela incerteza de uma variável (δX_i) para a incerteza global do resultado (δR). Todos os termos possuem a mesma forma: a derivada parcial de R em relação a X_i ,

multiplicada pela incerteza desta variável. A Equação (B.4) é válida quando as seguintes condições são observadas:

- Cada uma das medições é independente das demais;
- Se fossem realizadas medições repetidas de cada variável, sua dispersão apresentaria dispersão Gaussiana;
- A incerteza de cada variável é expressa com a mesma probabilidade.

Na maioria das situações, a incerteza global de um resultado é dominada por apenas alguns de seus termos. Os termos na Equação (B.4), que são menores do que o maior termo por um fator de 3 ou mais, geralmente podem ser ignorados.

Em muitas aplicações, deseja-se que a incerteza de um resultado seja expressa como uma fração deste. Em particular, quando a expressão do resultado pode ser escrita na forma de um produto, tal como na Equação (B.5), a incerteza relativa pode ser encontrada diretamente, isto é, se:

$$R = \left(X_1^a \cdot X_2^b \cdot X_3^c \cdot ....X_M^m\right) \tag{B5}$$

$$\frac{\delta R}{R} = \left[\left(a \cdot \frac{\delta X_1}{X_1}\right)^2 + \left(b \cdot \frac{\delta X_2}{X_2}\right)^2 + \left(c \cdot \frac{\delta X_3}{X_3}\right)^2 + ... + \left(m \cdot \frac{\delta X_M}{X_M}\right)^2\right]^{1/2} \tag{B6}$$

Essa é uma forma natural e conveniente de calcular a incerteza relativa do resultado, quando se conhece a incerteza relativa das variáveis envolvidas. Nesse caso, os expoentes de X_i são coeficientes de sensibilidade dos termos da Equação (B.6).

De acordo com Martins (1998), as incertezas associadas ao erro aleatório podem ser facilmente quantificadas, multiplicando-se o desvio padrão de um conjunto de medições pelo valor apropriado da variável *t* de Student, que é função do nível de confiança desejado, logo:

$$\delta X = \pm \sigma m \cdot t_{95\%} \tag{B.7}$$

O desvio padrão do conjunto de medições das médias é calculado como:

$$\sigma m = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \tag{B.8}$$

Obviamente se o conjunto de medição for unitário, $n = 1$, tem-se $\sigma m = \sigma$, logo:

$$\delta X = \pm \sigma \cdot t_{95\%} \tag{B.9}$$

O valor de *t* é função do número de graus de liberdade *v*, quando se trabalha com a média, $v = n - 1$. Para o nível de confiança de 95%, *t* pode ser calculado por:

$$t_{95\%} = 1{,}96 + \frac{2{,}36}{v} + \frac{3{,}20}{v^2} + \frac{5{,}20}{v^{3{,}84}} \tag{B.10}$$

O valor do desvio padrão σ por sua vez pode ser calculado por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \left(X_i - \overline{X}\right)^2}{(n-1)}} \tag{B.11}$$

Onde a média $\overline{X}$ é dada por:

$$\overline{X} = \frac{\sum X_i}{(n)} \tag{B.12}$$

B.3 Análise de incerteza das variáveis de interesse

B.3.1 Diâmetros

Segundo Delmée (1983), as incertezas dos diâmetros δD e δd, podem ser conhecidos, ou avaliados como segue.

A incerteza sobre o valor do diâmetro interno do tubo, δD.

- Quando *D* não é medido ou extraído de tabelas, $\delta D = \pm 0{,}5\%$ (caso em estudo).
- Quando *D* é medido, $\delta D = \pm 0{,}10\%$

A incerteza sobre o valor do diâmetro do orifício, δd, foi extraído da norma de fabricação de placas de orifício ISA-RP 3.2, ou seja.

- Para o valor de *d*: Menor que 6,35 mm, tem-se $\delta d = \pm$ 0,00762 mm

logo, para:

d = 3,80 mm, tem-se $\delta d = \pm$ 0,201 %

d = 5,01 mm, tem-se $\delta d = \pm$ 0,152 %

- de 6,35 a 9,525 mm, tem-se $\delta d = \pm$ 0,0127 mm

logo, para:

d = 8,59 mm, tem-se $\delta d = \pm$ 0,148 %

Para ter controle sobre estes diâmetros foi feita análise dimensional de todos os diâmetros e verificou-se que todos estavam dentro das tolerâncias de fabricação, por isso, por

questão de padronização, foram adotadas incertezas como descritas acima. Portanto, este procedimento teve o intuito de critério de aceitação do processo de fabricação, quando na verdade a análise dimensional teria um impacto direto no cálculo de incertezas de variáveis onde os diâmetros fossem parte da equação envolvida.

B.3.2 Pressão diferencial

Os valores de Pressão diferencial foram colhidos da leitura do LD301D2, através do *software* de monitoramente do CD600, fabricante Smar, cuja tela é apresentada na Figura B.1.



Figura B.1: Software de monitoramento Smar.

Ao final do experimento o software fornece os valores da Pressão diferencial em função do tempo do ensaio em uma planilha do Ecel da Micorsoft Office.

As incertezas da Pressão Diferencial (δDp) são compostas por incertezas sistemáticas e aleatórias. As incertezas sistemáticas foram extraídas do manual do fabricante Smar e a incertezas aleatórias da dispersão das Pressões Diferenciais coletadas seguindo as recomendações de Martins (1998).

As incertezas sistemáticas são mostradas Tabela B.1 (Manual do equipamento LD301 Smar).

Tabela B.1: Incertezas sistemáticas do transmissor de pressão (Smar).

	Especificações
Condições de Referência	Span iniciando em zero, temperatura: 25°C (77°F), pressão atmosférica, alimentação: 24 Vdc, fluido de enchimento em Silicone, anéis de vedação em Buna-N, diafragmas isoladores em Aço Inox 316L e trim digital igual aos valores inferior e superior da faixa.
Exatidão	**Para faixa 0 e modelos diferenciais ou manométricos e diafragma de Aço Inox 316L ou Hastelloy com fluido de enchimento em Silicone ou Halocarbon:** **0,2URL ≤ span ≤ URL:** ± 0,1% do span **0,05URL ≤ span < 0,2 URL:** ± [0,025 + 0,015 URL/span]% do span **Para faixas 1, 2, 3, 4, 5 ou 6, modelos diferenciais ou manométricos e diafragma de Aço Inox 316L ou Hastelloy com fluido de enchimento em Silicone e Halocarbon:** **0,1 URL ≤ span ≤ URL:** ± 0,075% do span **0,025 URL ≤ span < 0,1 URL:** ± [0,0375+0,00375 URL/span]% do span **0,0083 URL ≤ span < 0,025 URL:** ± [0,0015+0,00465 URL/span]% do span **Para faixas 2 a 6 e modelos absolutos. Para diafragmas em Tântalo ou Monel. Para fluido de enchimento em Fluorolube:** **0,1 URL ≤ span ≤ URL:** ± 0,1% do span **0,025 URL ≤ span < 0,1 URL:** ± [0,05+0,005 URL/span]% do span **0,0083 URL ≤ span < 0,025 URL:** ± [0,01+0,006 URL/span]% do span **Para faixa 1 e modelo absoluto:** 0,2% do span **Para faixas 2, 3 ou 4 e modelo de nivel com diafragma de Aço Inox 316L com fluido de enchimento em Silicone e Halocarbon com a pressão máxima de acordo com a classe de pressão do flange:** **0,1 URL ≤ span ≤ URL:** ± 0,075% do span **0,025 URL ≤ span < 0,1 URL:** ± [0,0375+0,00375 URL/span]% do span **0,0083 URL ≤ span < 0,025 URL:** ± [0,0015+0,00465 URL/span]% do span Efeitos de linearidade, histerese e repetibilidade estão incluídos.
Estabilidade	**Para faixas 2, 3, 4, 5 e 6:** ± 0,15% do URL por 5 anos para mudança de temperatura de 20 oC e até 7 MPa (1000 psi) de pressão estática **Para faixas 0 e 1:** ± 0,2% do URL por 12 meses para mudança de temperatura de 20 oC e até 100 kPa (1 bar) de pressão estática **Para modelos de nível:** ± 0,2% do URL por 12 meses para mudança de temperatura de 20 oC
Efeito de Temperatura	**Para faixa 2, 3, 4, 5 e 6:** **0,2 URL ≤ span ≤ URL:** ± [0,02% URL+0,06% span] por 20ºC. **0,0085 URL ≤ span < 0,2URL:** ± [0,023% URL+0,045% span] por 20ºC. **Para faixa 1:** **0,2 URL ≤ span ≤ URL:** ± [0,08% URL+0,05% span] por 20ºC. **0,025 URL ≤ span < 0,2 URL:** ± [0,06% URL+0,15% span] por 20ºC. **Para faixa 0:** **0,2 URL ≤ span ≤ URL:** ± [0,15% URL+0,05% span] por 20ºC. **0,05 URL ≤ span < 0,2 URL:** ± [0,1% URL+0,3% span] por 20ºC. **Para Modelo de Nível:** 6 mmH2O por 20ºC para flange de 4” e DN100. 17 mmH2O por 20ºC para flange de 3” e DN80. Consulte a Smar para outras dimensões de flange e fluido de enchimento.
Efeito de Pressão Estática	**Erro de zero:** **Para faixas 2, 3, 4, 5 e 6:** ± 0,033% URL por 7MPa (1000 psi) **Para faixa 1:** ± 0,05% URL por 1,7 MPa (250 psi) **Para faixa 0:** ± 0,1% URL por 0,5 MPa (5 bar) **Para modelos de nível:** ± 0,1% URL por 3,5 MPa (500 psi) O erro de zero é um erro sistemático que pode ser eliminado calibrando-se o transmissor para a pressão estática de operação. **Erro de span:** **Para faixas 2, 3, 4, 5 e 6:** corrigível a ± 0,2% da leitura por 7 MPa (1000 psi) **Para faixa 1 e modelos de nível:** corrigível a ± 0,2% da leitura por 3,5 MPa (500 psi) **Para faixa 0:** corrigível a ± 0,2% da leitura por 0,5 MPa (5 bar)
Efeito da Alimentação	± 0,005% do span calibrado por volt.
Efeito da Posição de Montagem	Desvio de zero de até 250 Pa (1 inH2O) que pode ser eliminado através da calibração. Nenhum efeito no span.
Efeito de Interferência Eletromagnética	Aprovado de acordo com IEC61326-1:2006, IEC61326-2-3:2006, IEC61000-6-4:2006, IEC61000-6-2:2005

Nota: *URL = Limite superior da faixa*
LRL = Limite inferior da faixa

Fonte: adaptada de Smar 2008

Para uma faixa de calibração de 0 a 5000 mmca, faixa de temperatura de 20 a 30ºC, Pressão estática de 1 bar g, tem-se as incertezas do transmissor de pressão diferencial (Figura B.2):

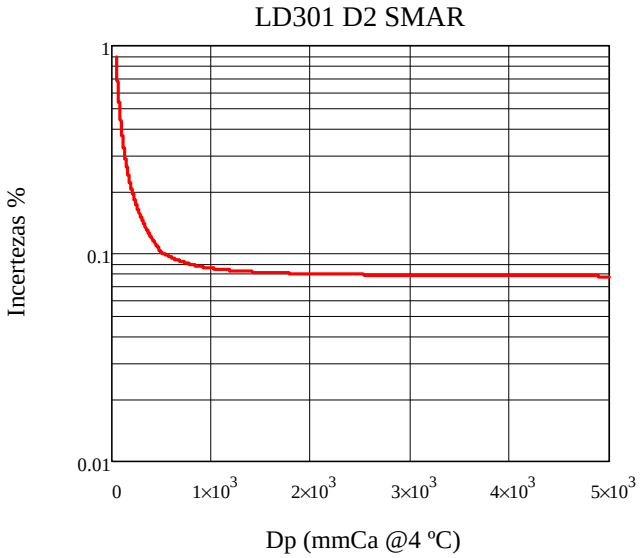


Figura B.2: Incertezas sistemáticas do transmissor de pressão.

Durante todo o experimento foram coletadas as pressões diferenciais e feitas suas médias, obtendo-se o desvio padrão para cada média e através da equação de $t_{95\%}$, que é o coeficiente de Student para uma confiança de 95%, calculou-se a incerteza aleatória, podendo ser resumida nas Figuras B.3 a B.5.

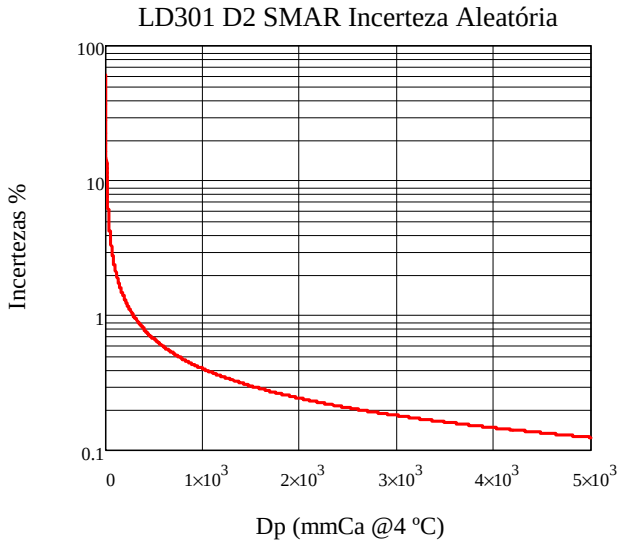


Figura B.3: Incerteza aleatória do transmissor de pressão para E001.

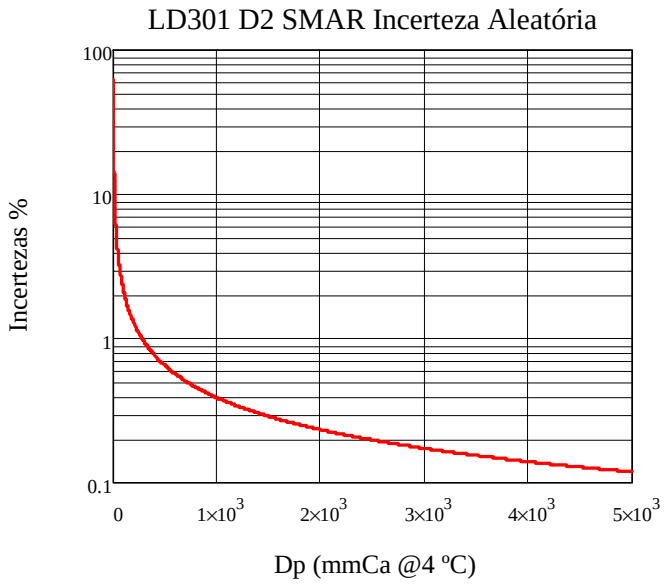


Figura B.4: Incerteza aleatória do transmissor de pressão para E002.

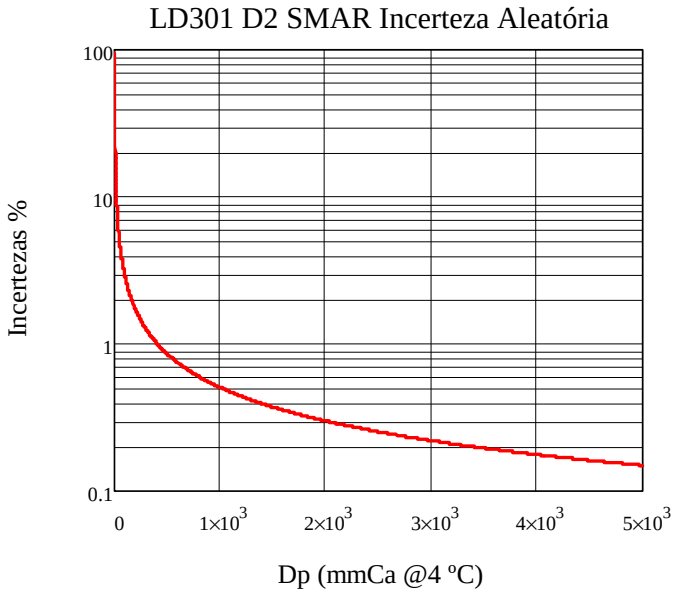


Figura B.5: Incerteza aleatória do transmissor de pressão para E003.

Adicionando as incertezas do transmissor de pressão às incertezas aleatórias pode-se calcular a incerteza combinada da pressão diferencial média em função das faixas do número de Reynolds, conforme mostrado na Tabela B.2.

Tabela B.2: Incertezas relativas de pressão diferencial por faixa de Reynolds.

	Dp médio (mmCa) Diâmetros dos Orifícios (mm)			Incertezas de Dp médio (%) Diâmetros dos Orifícios (mm)		
Reynolds	3,80	5,01	8,59	3,80	5,01	8,59
1000	99,750	---	---	2,181	---	---
2000	528,250	105,750	---	0,647	2,064	---
3000	1367,375	381,750	---	0,330	0,800	---
4000	2329,188	706,188	42,688	0,231	0,511	5,620
5000	3650,313	1116,688	67,125	0,175	0,368	3,977
6000	---	1619,875	100,000	---	0,285	2,934
7000	---	2107,500	156,250	---	0,239	2,088
10000	---	4505,625	428,875	---	0,150	0,970
15000	---	---	955,929	---	---	0,531
20000	---	---	1753,188	---	---	0,341
25000	---	---	2965,375	---	---	0,236
30000	---	---	4129,125	---	---	0,189

B.3.3 Temperatura

A temperatura da água é um parâmetro que exerce grande influência sobre as suas propriedades físicas, tais como a viscosidade e a densidade. A temperatura foi medida com auxílio de um termômetro de coluna de mercúrio marca TWG modelo Labothern-N, com escala de 15-30 ºC e incerteza de leitura de $\delta Termômetro = \pm 0{,}1^{o}C$.

Ao longo dos experimentos foram colhidas amostras de água para determinar a temperatura média, obtendo-se o desvio padrão para cada média e através da equação de $t_{95\%}$, que é o coeficiente de Student para uma confiança de 95%, calculou-se a incerteza aleatória, em que o experimento foi conduzido, e determinando suas incertezas combinadas, como mostrado na Tabela B.3.

Tabela B.3: Incertezas relativas da temperatura por diâmetros.

Diâmetros Orifícios (mm)	Temperaturas Médias (º C)	Incertezas (%)
3,80	26,600	0,800
5,01	26,700	1,070
8,59	27,820	0,860

B.3.4 Viscosidade absoluta e densidade da água

Existem na literatura diversas correlações bem estabelecidas para a viscosidade absoluta e a densidade da água, em dependência com a temperatura, entretanto, no presente estudo foram adotadas as correlações de Martins (1998):

$$\mu(T) = e^{\left[a + \frac{b}{(T + 273{,}15)} + c \cdot (T + 273{,}15) + d \cdot (T + 273{,}15)^2 \right]} \tag{B.13}$$

Sendo, a = -2,471 x 10^1, b = 4,209 x 10^3 , d = -3,376 x 10^{-5} , c = 4,527 x 10^{-2}, μ em centipoise (Cp) e T em (ºC).

$$\rho(T) = \begin{pmatrix} 9{,}998395639 \times 10^2 + 6{,}798299989 \times 10^{-2} \times \mathrm{T}^1 - \\ 9{,}106025564 \times 10^{-3} \times \mathrm{T}^2 + 1{,}005272999 \times 10^{-4} \times \mathrm{T}^3 - \\ 1{,}12671313526 \times 10^{-6} \times \mathrm{T}^4 + 6{,}591795606 \times 10^{-9} \times \mathrm{T}^5 \end{pmatrix} \tag{B.14}$$

Sendo ρ em (kg/m^3) e T em (ºC).

A incerteza da viscosidade pode ser escrita como:

$$\delta\mu = \left[\left(\frac{\partial \mu}{\partial T} \cdot \delta T \right)^2 \right]^{1/2} \tag{B.15}$$

logo:

$$\delta\mu = \left[\left(\left[e^{\left(a + \frac{b}{(T+273{,}15)} + d \cdot (T+273{,}15)^2 + c \cdot (T+273{,}15) \right)} \cdot \left(c + d \cdot (2 \cdot T + 546{,}3) - \frac{b}{(T + 273{,}15)^2} \right) \right] \cdot \delta T \right)^2 \right]^{1/2} \tag{B.16}$$

Onde os termos dessas equações devem estar nas seguintes unidades: μ e $\delta\mu$ em centipoise (Cp); T e δT em (ºC) e as constantes a, b, c e d, são as mesmas definidas para a Equação B.13.

A incerteza da densidade pode ser escrita como:

$$\delta\rho = \left[\left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \cdot \delta T \right)^2 \right]^{1/2} \tag{B.17}$$

Logo:

$$\delta\rho = \left[\left(\left[\begin{array}{l} -1{,}8212051128 \cdot 10^{-2} \cdot T + 3{,}015818997 \cdot 10^{-4} \cdot \mathrm{T}^2 + \\ -4{,}50685254104 \cdot 10^{-6} \cdot \mathrm{T}^3 + \\ +3{,}295897803 \cdot 10^{-8} \cdot \mathrm{T}^4 + 6{,}798299989 \cdot 10^{-2} \end{array} \right] \cdot \delta T \right)^2 \right]^{1/2} \tag{B.18}$$

Onde os termos dessas equações devem estar nas seguintes unidades: ρ e $\delta\rho$ em (kg/m^3); T e δT em (ºC).

Em resumo nas Tabelas B.4 e B.5 são apresentadas as incertezas da densidade e viscosidade respectivamente, para cada experimento.

Tabela B.4: Incertezas relativas da densidade por diâmetros.

Diâmetros Orifícios (mm)	Densidades (kg/m^3)	Incertezas (%)
3,80	996,621	0,006
5,01	996,593	0,008
8,59	996,283	0,007

Tabela B.5: Incertezas relativas da viscosidade por diâmetros.

Diâmetros Orifícios (mm)	Viscosidade (cp)	Incertezas (%)
3,80	0,876	0,464
5,01	0,874	0,621
8,59	0,853	0,512

B.3.5 Massa

As massas foram quantificadas com auxílio de uma balança digital Líder, Modelo B-160; ID1050, com peso máximo de 10 kg e mínimo de 20 gr, com incerteza de 1 gr. A

incerteza associada a estas medições foi determinada com um experimento auxiliar, que consistiu em realizar 30 medições independentes da massa, com isto conseguiu-se estimar a incerteza aleatório da balança.

Cada medição iniciou-se com a verificação do zero da balança e depois fez-se a tara do balde para coleta de água com uma certa massa de água no seu interior. Foram utilizadas três massas diferentes e verificado um desvio padrão de $5x10^{-3}$ kg e calculada a incerteza associada a dispersão das massas pela Equação (B.7). Assim, a incerteza aleatória das massas foi estimada como:

$$\delta M\,(d=3{,}80)=\delta M\,(d=5{,}01)=\delta M\,(d=8{,}59)=1\times10^{-3}\,kg$$

O erro humano na coleta da água foi determinado através de experimento que consistiu em verificar o atraso em relação ao cronômetro na entrada ou na saída da coleta e foi possível evidenciar um erro de 0,01 kg da massa coletada para todos os experimentos, que foi adicionado na composição da incerteza combinada da massa.

Em resumo, na Tabela B.6 são apresentadas as incertezas combinadas da massa em função do número de Reynolds para cada experimento.

Tabela B.6: Incertezas relativas da massa por faixa de Reynolds.

	Diâmetros dos Orifícios (mm)			Diâmetros dos Orifícios (mm)		
	3,80	5,01	8,59	3,80	5,01	8,59
Reynolds	Massa (kg)			Incertezas de Massa (%)		
1000	0,241	---	---	4,189	---	---
2000	0,471	0,453	---	2,143	2,228	---
3000	0,741	0,741	---	1,362	1,362	---
4000	0,951	0,971	1,107	1,061	1,040	0,912
5000	1,180	1,223	1,212	0,855	0,825	0,833
6000	---	1,458	1,352	---	0,692	0,747
7000	---	1,643	1,584	---	0,614	0,637
10000	---	2,378	2,392	---	0,425	0,422
15000	---	---	3,429	---	---	0,285
20000	---	---	4,550	---	---	0,222
25000	---	---	5,843	---	---	0,173
30000	---	---	6,859	---	---	0,147

B.3.6 Tempo

O tempo foi determinado com auxílio de um cronômetro digital da marca Cronobio, modelo SW2018, com incerteza de 0,01 s.

Foi estimado um erro humano na coleta da água através de um experimento onde se conseguiu perceber a perda média de 0,6 s entre o acionamento (start) e a parada (stop) do cronômetro, por meio do acionamento e parada do instrumento várias vezes e fazendo-se uma média destes tempos.

Em resumo podem ser vistas na Tabela B.7 as incertezas combinadas do tempo em função do número de Reynolds para cada experimento.

Tabela B.7: Incertezas relativas de tempo por faixa de Reynolds.

	Diâmetros dos Orifícios (mm)			Diâmetros dos Orifícios (mm)		
	3,80	5,01	8,59	3,80	5,01	8,59
Reynolds	Tempo (s)			Incertezas de Tempo em (%)		
1000	19,94	---	---	0,058	---	---
2000	20,06	20,34	---	0,058	0,057	---
3000	20,10	20,38	---	0,058	0,057	---
4000	20,06	20,31	20,03	0,058	0,057	0,058
5000	20,03	20,56	19,93	0,058	0,057	0,059
6000	---	20,38	20,06	---	0,057	0,058
7000	---	20,34	20,03	---	0,057	0,058
10000	---	20,29	20,09	---	0,057	0,058
15000	---	---	20,03	---	---	0,058
20000	---	---	20,03	---	---	0,058
25000	---	---	19,97	---	---	0,058
30000	---	---	19,94	---	---	0,058

B.3.7 Vazão real ou experimental

A vazão real ou experimental foi obtida através do método da coleta de massa de um determinado volume de fluido e seu respectivo tempo de coleta, resumido pela equação abaixo:

$$Qreal_{vol} = \frac{Volume}{Tempo} = \frac{Massa}{Tempo \cdot Densidade} = Massa \cdot Tempo^{-1} \cdot Densidade^{-1} \qquad \text{(B.19)}$$

$$Qreal_{vol} = m \cdot t^{-1} \cdot \rho^{-1} \qquad \text{(B.20)}$$

A incerteza da vazão real se calcula pela equação:

$$\delta Qreal_{vol} = \left[\left(\frac{\partial Qreal_{vol}}{\partial m} \cdot \delta m \right)^2 + \left(\frac{\partial Qreal_{vol}}{\partial t} \cdot \delta t \right)^2 + \left(\frac{\partial Qreal_{vol}}{\partial \rho} \cdot \delta \rho \right)^2 \right]^{1/2} \quad \text{(B.21)}$$

Logo:

$$\delta Qreal_{vol} = \left[\left(\frac{1}{\rho \cdot t} \cdot \delta m \right)^2 + \left(\frac{m}{\rho \cdot t^2} \cdot \delta t \right)^2 + \left(\frac{m}{\rho^2 \cdot t} \cdot \delta \rho \right)^2 \right]^{1/2} \quad \text{(B.22)}$$

Onde os termos dessas equações devem estar nas seguintes unidades: $Qreal_{vol}$ e $\delta Qreal_{vol}$ em (m^3/s); ρ e $\delta\rho$ em (kg/ m^3); t e δt em segundos (s); m e δm em (kg).

Em resumo, na Tabela B.8 são listadas as incertezas combinadas da vazão real em função do número de Reynolds para cada experimento.

Tabela B.8: Incertezas relativas da vazão real por faixa de Reynolds.

	Diâmetros do Orifícios (mm)			Diâmetros do Orifícios (mm)		
	3,80	5,01	8,59	3,80	5,01	8,59
Reynolds	Q experimental (L/minutos)			Incertezas de Q experimental (%)		
1000	0,728	---	---	4,189	---	---
2000	1,414	1,341	---	2,144	2,229	---
3000	2,219	2,189	---	1,364	1,364	---
4000	2,854	2,878	3,328	1,063	1,041	0,914
5000	3,547	3,581	3,662	0,857	0,827	0,835
6000	---	4,307	4,059	---	0,695	0,749
7000	---	4,863	4,763	---	0,617	0,640
10000	---	7,056	7,171	---	0,428	0,426
15000	---	---	10,310	---	---	0,295
20000	---	---	13,680	---	---	0,229
25000	---	---	17,621	---	---	0,182
30000	---	---	20,716	---	---	0,159

B.3.8 Vazão teórica

A Vazão teórica foi obtida da equação de Bernoulli, modificada como segue:

$$Qreal_{vol} = C \cdot E \cdot \beta^2 \cdot S_1 \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot \Delta p}}{\sqrt{\rho}} \quad \text{(B.23)}$$

Mas:

$$C = \frac{Qreal}{Qteórico} \quad \text{(B.24)}$$

Substituindo a Equação (B.22) na Equação (B.21), tem-se:

$$Qreal_{vol} = \frac{Qreal_{vol}}{Qteórico_{vol}} \cdot E \cdot \beta^2 \cdot S_1 \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot \Delta p}}{\sqrt{\rho}} \tag{B.25}$$

$$Qteórico_{vol} = \frac{Qreal_{vol}}{Qreal_{vol}} \cdot E \cdot \beta^2 \cdot S_1 \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot \Delta p}}{\sqrt{\rho}} \tag{B.26}$$

Logo:

$$Qteórico_{vol} = E \cdot \beta^2 \cdot S_1 \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot \Delta p}}{\sqrt{\rho}} \tag{B.27}$$

Onde:

O coeficiente de aproximação *E* pode ser escrito como:

$$E = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}} \tag{B.28}$$

A área da secção 1 e 2, S_1 e S_2, respectivamente, podem ser escritas como:

$$S_1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \tag{B.29}$$

$$S_2 = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \tag{B.30}$$

A relação das áreas β pode ser escrita como:

$$\beta = \sqrt{\frac{S_2}{S_1}} = \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot d^2}{4}}{\frac{\pi \cdot D^2}{4}}} = \sqrt{\frac{d^2}{D^2}} = \frac{d}{D} \tag{B.31}$$

Portanto, substituindo as equações de (B.28) até (B.31) na equação (B.27), tem-se:

$$Qteórico_{vol} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \beta^2 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot \Delta p}}{\sqrt{\rho}} \tag{B.32}$$

$$Qteórico_{vol} = \frac{1}{\sqrt{1-(d/D)^4}} \cdot (d/D)^2 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot \Delta p}}{\sqrt{\rho}} \tag{B.33}$$

$$Qteórico_{vol} = \frac{\pi \cdot \sqrt{2}}{4} \cdot \left[\frac{(d/D)^2}{\sqrt{1-(d/D)^4}} \cdot D^2 \cdot \frac{\sqrt{\Delta p}}{\sqrt{\rho}} \right] \tag{B.34}$$

$$Const = \frac{\pi \cdot \sqrt{2}}{4} \tag{B.35}$$

Logo:

$$Qteórico_{vol} = Const \cdot \left[\frac{d^2}{\sqrt{1-(d/D)^4}} \cdot \frac{\sqrt{\Delta p}}{\sqrt{\rho}} \right] \tag{B.36}$$

Mas a incerteza de vazão teórica pode ser escrita como:

$$\delta Qteórico_{vol} = \left[\begin{array}{l} \left(\frac{\partial Qteórico_{vol}}{\partial D} \cdot \delta d \right)^2 + \left(\frac{\partial Qteórico_{vol}}{\partial d} \cdot \delta d \right)^2 + \\ + \left(\frac{\partial Qteórico_{vol}}{\partial \rho} \cdot \delta \rho \right)^2 + \left(\frac{\partial Qteórico_{vol}}{\partial \Delta p} \cdot \delta \Delta p \right)^2 \end{array} \right]^{1/2} \tag{B.37}$$

Onde as derivadas parciais podem ser escritas:

$$\frac{\partial Qteórico_{vol}}{\partial D} = \left[\frac{2 \cdot Const \cdot d^6 \cdot \sqrt{\Delta p}}{D^5 \cdot \sqrt{\rho} \cdot \left(1-(d/D)^4\right)^{\frac{3}{2}}} \right] \tag{B.38}$$

$$\frac{\partial Qteórico_{vol}}{\partial d} = \left[\frac{2 \cdot Const \cdot d \cdot \sqrt{\Delta p}}{\sqrt{\rho} \cdot \left(1-(d/D)^4\right)^{\frac{1}{2}}} \right] + \left[\frac{2 \cdot Const \cdot d^5 \cdot \sqrt{\Delta p}}{D^4 \cdot \sqrt{\rho} \cdot \left(1-(d/D)^4\right)^{\frac{3}{2}}} \right] \tag{B.39}$$

$$\frac{\partial Qteórico_{vol}}{\partial \rho} = \left[\frac{Const \cdot d^2 \cdot \sqrt{\Delta p}}{2 \cdot \rho^{\frac{3}{2}} \cdot \left(1-(d/D)^4\right)^{\frac{1}{2}}} \right] \tag{B.40}$$

$$\frac{\partial Qteórico_{vol}}{\partial \Delta p} = \left[\frac{Const \cdot d^2}{2 \cdot \sqrt{\rho} \cdot \sqrt{\Delta p} \cdot \left(1-(d/D)^4\right)^{\frac{1}{2}}} \right] \tag{B.41}$$

Portanto, substituindo as Equações de (B.38) até (B.41) na Equação (B.37), tem-se:

$$\partial Qteórico_{vol} = \left[\begin{array}{l} \left(\left(\frac{2 \cdot Const \cdot d^6 \cdot \sqrt{\Delta p}}{D^5 \cdot \sqrt{\rho} \cdot \left(1-(d/D)^4\right)^{\frac{3}{2}}} \right) \cdot \delta d \right)^2 + \\ + \left(\left(\left(\frac{2 \cdot Const \cdot d \cdot \sqrt{\Delta p}}{\sqrt{\rho} \cdot \left(1-(d/D)^4\right)^{\frac{1}{2}}} \right) + \left(\frac{2 \cdot Const \cdot d^5 \cdot \sqrt{\Delta p}}{D^4 \cdot \sqrt{\rho} \cdot \left(1-(d/D)^4\right)^{\frac{3}{2}}} \right) \right) \cdot \delta d \right)^2 + \\ + \left(\left(\frac{Const \cdot d^2 \cdot \sqrt{\Delta p}}{2 \cdot \rho^{\frac{3}{2}} \cdot \left(1-(d/D)^4\right)^{\frac{1}{2}}} \right) \cdot \delta \rho \right)^2 + \\ + \left(\left(\frac{Const \cdot d^2}{2 \cdot \sqrt{\rho} \cdot \sqrt{\Delta p} \cdot \left(1-(d/D)^4\right)^{\frac{1}{2}}} \right) \cdot \delta \Delta p \right)^2 \end{array} \right]^{1/2} \quad \text{(B.42)}$$

Onde os termos dessas equações devem estar nas seguintes unidades: $Qteórico_{vol}$ e $\delta Qteórico_{vol}$ em (m^3/s); ρ e $\delta\rho$ em (kg/m^3); t e δt em segundos (s); m e δm em (kg); d, δd, D, δD em (m); Δp e $\delta \Delta p$ em (Pa).

Na Tabela B.9 são apresentadas as incertezas combinadas da vazão teórica em função do número de Reynolds para cada experimento.

Tabela B.9: Incertezas relativas da vazão teórica por faixa de Reynolds.

	Diâmetros dos Orifícios (mm)			Diâmetros dos Orifícios (mm)		
	3,80	5,01	8,59	3,80	5,01	8,59
Reynolds	Q Teórica (L/minutos)			Incertezas de Q Teórica (%)		
1000	0,954	---	---	1,214	---	---
2000	2,196	1,712	---	0,647	1,132	---
3000	3,533	3,253	---	0,559	0,613	---
4000	4,611	4,425	3,296	0,546	0,531	2,850
5000	5,773	5,564	4,133	0,541	0,500	2,045
6000	---	6,702	5,044	---	0,486	1,543
7000	---	7,644	6,306	---	0,480	1,148
10000	---	11,177	10,447	---	0,471	0,680
15000	---	---	15,597	---	---	0,531
20000	---	---	21,122	---	---	0,507
25000	---	---	27,470	---	---	0,491
30000	---	---	32,415	---	---	0,486

B.3.9 Número de Reynolds

O número de Reynolds do escoamento para tubulação é definido pela seguinte expressão:

$$\mathrm{Re}_D = \frac{\rho \cdot Vm \cdot D}{\mu} \tag{B.43}$$

Mas

$$Vm = \frac{Qreal_{vol}}{A_{Tubo}} = \frac{Qreal_{vol}}{\frac{\pi \cdot D^2}{4}} = \frac{4 \cdot Qreal_{vol}}{\pi \cdot D^2} \tag{B.44}$$

Logo o número de Reynolds pode ser escrito como:

$$\mathrm{Re}_D = \frac{4 \cdot \rho \cdot Qreal_{vol}}{\pi \cdot \mu \cdot D} \tag{B.45}$$

Sendo D é o diâmetro interno do tubo.

A incerteza de Reynolds pode ser escrita como:

$$\delta \mathrm{Re}_D = \left[\left(\frac{\partial \mathrm{Re}_D}{\partial \rho} \cdot \delta\rho \right)^2 + \left(\frac{\partial \mathrm{Re}_D}{\partial Qreal_{vol}} \cdot \delta Qreal_{vol} \right)^2 + \left(\frac{\partial \mathrm{Re}_D}{\partial \mu} \cdot \delta\mu \right)^2 + \left(\frac{\partial \mathrm{Re}_D}{\partial D} \cdot \delta D \right)^2 \right]^{1/2} \tag{B.46}$$

Logo:

$$\delta \mathrm{Re}_D = \left[\begin{array}{l} \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{Qreal_{vol}}{\mu \cdot D} \cdot \delta\rho \right)^2 + \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{\rho}{\mu \cdot D} \cdot \delta Qreal_{vol} \right)^2 + \\ + \left(-\frac{4}{\pi} \cdot \frac{\rho \cdot Qreal_{vol}}{\mu^2 \cdot D} \cdot \delta\mu \right)^2 + \left(-\frac{4}{\pi} \cdot \frac{\rho \cdot Qreal_{vol}}{\mu \cdot D^2} \cdot \delta D \right)^2 \end{array} \right]^{1/2} \tag{B.47}$$

Onde os termos dessas equações devem estar nas seguintes unidades: Re_D (adimensional); $Qreal_{vol}$ e $\delta Qreal_{vol}$ em (m^3/s); ρ e $\delta\rho$ em (kg/m^3); μ e $\delta\mu$ em (Pa.s); d , δd, D, δD em (m); Δp e $\delta\Delta p$ em (Pa).

Na Tabela B.10 são listadas as incertezas combinadas do Número de Reynolds em função da faixa de Reynolds para cada experimento.

Tabela B.10: Incertezas relativas do Número de Reynolds por faixa de Reynolds.

	Diâmetros do Orifícios em [mm]			Diâmetros do Orifícios em [mm]		
	3,80	5,01	8,59	3,80	5,01	8,59
Reynolds	Reynolds em [Adimensional]			Incertezas de Reynolds em [%]		
1000	1032,938	---	---	4,244	---	---
2000	2006,653	1907,652	---	2,250	2,367	---
3000	3150,681	3114,340	---	1,525	1,580	---
4000	4051,650	4095,069	4849,759	1,263	1,311	1,161
5000	5034,813	5095,130	5336,406	1,096	1,149	1,100
6000	---	6127,810	5914,245	---	1,058	1,036
7000	---	6918,924	6939,493	---	1,008	0,960
10000	---	10038,799	10448,039	---	0,905	0,833
15000	---	---	15022,426	---	---	0,776
20000	---	---	19933,519	---	---	0,751
25000	---	---	25675,053			0,738
30000	---	---	30184,861	---	---	0,733

B.3.10 Coeficiente de descarga

O coeficiente de descarga pode ser descrito como a relação entre a Vazão real e a Vazão teórica:

$$C = \frac{Qreal}{Qteórico} \tag{B.48}$$

De acordo com Delmée (1983), a incerteza sobre o coeficiente de vazão é dada assumindo que os valores de β, D e Re_D, são perfeitamente conhecidos, de forma que a incerteza é a mesma sobre C, $C.E$ ou $C.E\ \beta^2$, não havendo necessidade de acrescentar incerteza suplementar sobre E ou β^2 .

Logo a incerteza do coeficiente de vazão pode ser escrita como:

$$\delta C = \left[\left(\frac{\partial C}{Qreal_{vol}} \cdot \delta Qreal_{vol} \right)^2 + \left(\frac{\partial C}{Qteórico_{vol}} \cdot \delta Qteórico_{vol} \right)^2 \right]^{1/2} \tag{B.49}$$

Logo:

$$\delta C = \left[\left(\frac{1}{Qteórico_{vol}} \cdot \delta Qreal_{vol} \right)^2 + \left(\frac{Qreal_{vol}}{Qteórico_{vol}^{\ 2}} \cdot \delta Qteórico_{vol} \right)^2 \right]^{1/2} \tag{B.50}$$

Sendo os termos dessa equação devem estar nas seguintes unidades: C (adimensional); $Qreal_{vol}$ e $\delta Qreal_{vol}$, $Qteórico_{vol}$ e $\delta Qteórico_{vol}$ em (m^3/s).

As incertezas do coeficiente de descarga em função do número de Reynolds para cada experimento são apresentadas na Tabela B.11.

Tabela B.11: Incertezas relativas do Coeficiente de Descarga *C* por faixa de Reynolds.

	Diâmetros dos Orifícios (mm)			Diâmetros dos Orifícios (mm)		
	3,80	5,01	8,59	3,80	5,01	8,59
Reynolds	C [Adimensional]			Incertezas de C [%]		
1000	0,762473	---	---	4,361	---	---
2000	0,643664	0,783055	---	2,233	2,500	---
3000	0,628156	0,672837	---	1,474	1,495	---
4000	0,618923	0,650481	1,009878	1,195	1,169	2,993
5000	0,614363	0,643610	0,886147	1,014	0,967	2,209
6000	---	0,642685	0,804634	---	0,848	1,715
7000	---	0,636192	0,755296	---	0,782	1,314
10000	---	0,631303	0,686386	---	0,637	0,803
15000	---	---	0,661038	---	---	0,621
20000	---	---	0,647693	---	---	0,556
25000	---	---	0,641462	---	---	0,524
30000	---	---	0,639086	---	---	0,512

Apêndice C

NÚMERO DE REYNOLDS

Segundo Bassan (2011), Osborne Reynolds nasceu em Belfast, cidade da Irlanda, em 23 de agosto de 1842, em meio a uma clerical família Anglicana. Em Cambridge, Reynolds foi um bem sucedido aluno em matemática, tornando o septuagésimo aluno exemplar em matemática de Cambridge em 1867. Foi eleito, no mesmo ano, membro do "Queen's College", tal como seu pai, e imediatamente após começou a trabalhar na firma de engenharia civil de John Lawson, vindo a falecer em 1912.

No período de 1836 a 1839 Hagen e Poiseuille realizaram experiências independentes e simultâneas sobre o movimento dos líquidos em tubos de pequenos diâmetro, e foi observado que a pressão estática diminui com o valor da velocidade de forma linear, quando a velocidade é baixa, além disto observaram que essa lei de variação não é válida para altas velocidades e ainda que há dependência do diâmetro do tubo e da temperatura do líquido nesse fenômeno.

No ano de 1883, procurando observar o comportamento do escoamento dos líquidos, Osborne Reynolds empregou um dispositivo como esquematizado na Figura C.1, que consiste de um tubo de vidro transparente inserido em um recipiente com paredes de vidro. Um corante é introduzido na entrada do tubo. Ao abrir gradualmente a válvula, Reynolds observou a formação de um filete retilíneo. Neste tipo de movimento, definido como laminar, as partículas apresentam trajetórias bem definidas que não se cruzam. Ao abrir mais a torneira, a velocidade aumenta e o filamento se difunde no líquido, como conseqüência do movimento desordenado das partículas. Este regime denomina-se turbulento. Ao reverter o processo, o filamento regular se restabelece a partir de uma certa velocidade, a qual recebe a denominação de velocidade crítica inferior .

Após investigações experimentais e teóricas, Reynolds concluiu que o critério mais apropriado para se determinar o tipo de escoamento em uma canalização não se atém exclusivamente ao valor da velocidade, mas a uma expressão adimensional na qual a viscosidade do líquido também é levada em consideração. Este adimensional passou a ser conhecido como Número de Reynolds, sendo expresso da seguinte maneira:

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho \cdot Vm \cdot D}{\mu} \qquad \text{(C.1)}$$

Onde,

ρ é a densidade do fluido (kg/m^3);

Vm é a velocidade (m/s);

D é o diâmetro do conduto (m);

μ é denominada viscosidade dinâmica ou absoluta (Pa.s)

O aparato do experimento de Reynolds é esboçado através da Figura C.1.

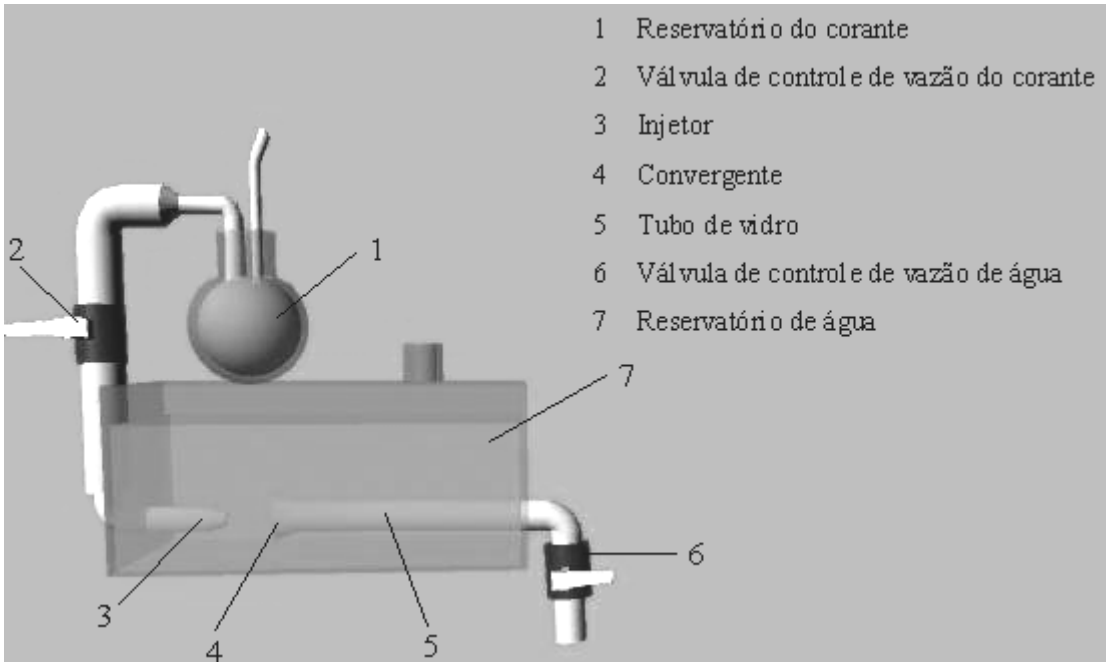


Figura C.1: Aparato experimental de Reynolds (Bassan, 2011)

Apêndice D

RESULTADOS COMPLETOS

Neste apêndice são apresentados todos os resultados gráficos obtidos no estudo realizado. A apresentação da grande quantidade de gráficos no Capítulo 5 (Resultados e discussões) ficaria complexa. Dessa maneira esse apêndice apresenta esses gráficos para comprovar os resultados obtidos.

Para facilitar a leitura é apresentada a Tabela D para relacionar as figuras e tabelas aos seus devidos tratamentos. Para uma boa compreensão dos gráficos e tabelas apresentados neste apêndice, recomenda-se a leitura do Capítulo 5.

Os três tratamentos adicionais, E031, E032 E033, foram feitos com o objetivo de investigar interferências dimensionais de fabricação. Além desses tratamentos foram feitos mais 15 medidas (IT001 a IT015), das quais as de IT001 a IT007 eram para o Tubo 1 (tubo liso) e as demais para o Tubo 2 (tubo rugoso), conforme descrito no Capítulo 4.

As tabelas D.1 a D.33 têm o objetivo de trazer dados e permitirem comparações por parte do leitor. Entre estes dados têm-se os coeficientes de descarga obtidos experimentalmente e suas correlações, além dos valores apresentados em literaturas para norma ISO 5167/2003 e os fabricantes Rosemount e Foxboro. Esses coeficientes estão representados para as condições: vazão máxima experimental obtida, limite inferior de Reynolds (um valor mais baixo obtido experimentalmente) e um valor de número de Reynolds comum entre os outros tratamentos.

Tabela D: Detalhamento das figuras e tabelas por experimento.

Tratamentos	Apêndice D	
	Figuras	Tabelas
E001 - Ø 1 = 3,80 mm, Borda Canto Vivo, Concêntrica, Tubo 1	D.1	D.1
E002 - Ø 2 = 5,01 mm, Borda Canto Vivo, Concêntrica, Tubo 1	D.2	D.2
E003 - Ø 3 = 8,59 mm, Borda Canto Vivo, Concêntrica, Tubo 1	D.3a e D.3b	D.3
E004 - Ø 1 = 3,80 mm, Borda Canto Vivo, Excentricidade = d/2, Tubo 1	D.4	D.4
E005 - Ø 2 = 5,01 mm, Borda Canto Vivo, Excentricidade = d/2, Tubo 1	D.5	D.5
E006 - Ø 3 = 8,59 mm, Borda Canto Vivo, Excentricidade = d/2, Tubo 1	D.6	D.6
E007 - Ø 1 = 3,80 mm, Borda Canto Vivo, Excentricidade = d/4, Tubo 1	D.7	D.7
E008 - Ø 2 = 5,01 mm, Borda Canto Vivo, Excentricidade = d/4, Tubo 1	D.8	D.8
E009 - Ø 3 = 8,59 mm, Borda Canto Vivo, Excentricidade = d/4, Tubo 1	D.9	D.9
E010 - Ø 1 = 3,80 mm, Borda Cônica, Concêntrica, Tubo 1	D.10	D.10
E011 - Ø 2 = 5,01 mm, Borda Cônica, Concêntrica, Tubo 1	D.11	D.11
E012 - Ø 3 = 8,59 mm, Borda Cônica, Concêntrica, Tubo 1	D.12	D.12
E013 - Ø 1 = 3,80 mm, Borda 1/4 de Circulo, Concêntrica, Tubo 1	D.13	D.13
E014 - Ø 2 = 5,01 mm, Borda 1/4 de Circulo, Concêntrica, Tubo 1	D.14	D.14
E015 - Ø 3 = 8,59 mm, Borda 1/4 de Circulo, Concêntrica, Tubo 1	D.15	D.15
E016 - Ø 1 = 3,80 mm, Borda Canto Vivo, Concêntrica, Tubo 2	D.16	D.16
E017 - Ø 2 = 5,01 mm, Borda Canto Vivo, Concêntrica, Tubo 2	D.17	D.17
E018 - Ø 3 = 8,59 mm, Borda Canto Vivo, Concêntrica, Tubo 2	D.18	D.18
E019 - Ø 1 = 3,80 mm, Borda Canto Vivo, Excentricidade = d/2, Tubo 2	D.19	D.19
E020 - Ø 2 = 5,01 mm, Borda Canto Vivo, Excentricidade = d/2, Tubo 2	D.20	D.20
E021 - Ø 3 = 8,59 mm, Borda Canto Vivo, Excentricidade = d/2, Tubo 2	D.21	D.21
E022 - Ø 1 = 3,80 mm, Borda Canto Vivo, Excentricidade = d/4, Tubo 2	D.22	D.22
E023 - Ø 2 = 5,01 mm, Borda Canto Vivo, Excentricidade = d/4, Tubo 2	D.23	D.23
E024 - Ø 3 = 8,59 mm, Borda Canto Vivo, Excentricidade = d/4, Tubo 2	D.24	D.24
E025 - Ø 1 = 3,80 mm, Borda Cônica, Concêntrica, Tubo 2	D.25	D.25
E026 - Ø 2 = 5,01 mm, Borda Cônica, Concêntrica, Tubo 2	D.26	D.26
E027 - Ø 3 = 8,59 mm, Borda Cônica, Concêntrica, Tubo 2	D.27	D.27
E028 - Ø 1 = 3,80 mm, Borda 1/4 de Circulo, Concêntrica, Tubo 2	D.28	D.28
E029 - Ø 2 = 5,01 mm, Borda 1/4 de Circulo, Concêntrica, Tubo 2	D.29	D.29
E030 - Ø 3 = 8,59 mm, Borda 1/4 de Circulo, Concêntrica, Tubo 2	D.30	D.30
E031 - Ø 1 = 3,80 mm, Borda Canto Vivo, Concêntrica, Tubo 1, (adicional)	D.31	D.31
E032 - Ø 1 = 3,80 mm, Borda Canto Vivo, Concêntrica, Tubo 1, (adicional)	D.32	D.32
E033 - Ø 1 = 3,80 mm, Borda Canto Vivo, Concêntrica, Tubo 1, (adicional)	D.33	D.33
IT001 - Intensidade Turbulenta, Re 7321, Tubo 1	D.34 e D.35	-
IT002 - Intensidade Turbulenta, Re 11068, Tubo 1	D.36 e D.37	-
IT003 - Intensidade Turbulenta, Re 11796, Tubo 1	D.38 e D.39	-
IT004 - Intensidade Turbulenta, Re 16920, Tubo 1	D.40 e D.41	-
IT005 - Intensidade Turbulenta, Re 21329, Tubo 1	D.42 e D.43	-
IT006 - Intensidade Turbulenta, Re 29713, Tubo 1	D.44 e D.45	-
IT007 - Intensidade Turbulenta, Re 7167, Tubo 2	D.46 e D.47	-
IT008 - Intensidade Turbulenta, Re 9088, Tubo 2	D.48 e D.49	-
IT009 - Intensidade Turbulenta, Re 9956, Tubo 2	D.50 e D.51	-
IT010 - Intensidade Turbulenta, Re 10295, Tubo 2	D.52 e D.53	-
IT011 - Intensidade Turbulenta, Re 12936, Tubo 2	D.54 e D.55	-
IT012 - Intensidade Turbulenta, Re 15927, Tubo 2	D.56 e D.57	-
IT013 - Intensidade Turbulenta, Re 19914, Tubo 2	D.58 e D.59	-
IT014 - Intensidade Turbulenta, Re 27422, Tubo 2	D.60 e D.61	-
IT015 - Intensidade Turbulenta, Re 29569, Tubo 2	D.62 e D.63	-

Ø = Diâmetro do orifício.

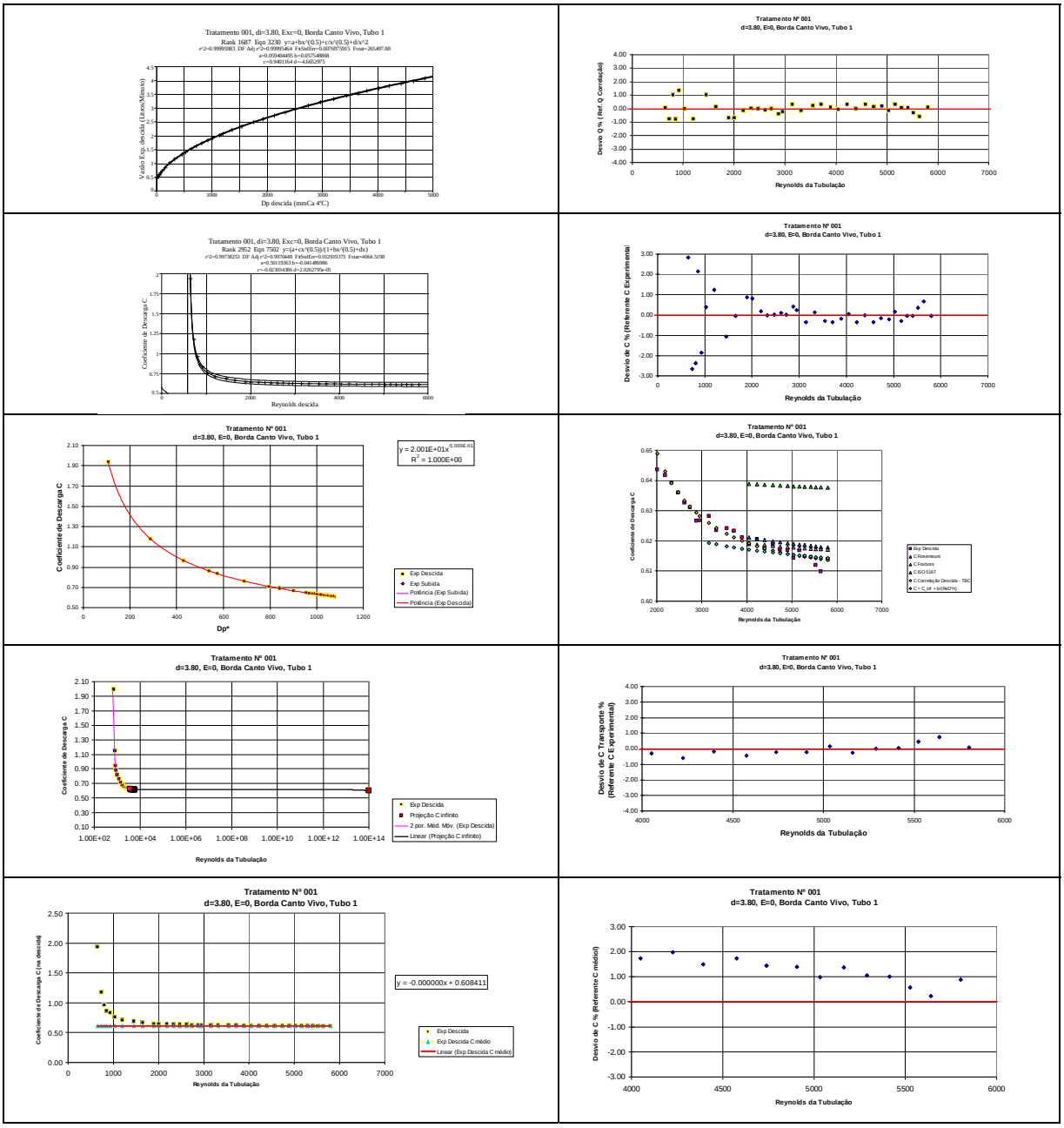


Figura D.1: Gráficos para o Tratamento E001.

Tabela D.1: Tratamento E001.

Condição	Observação			Coeficientes		Coeficientes para Orifício com Borda Canto Vivo e Concêntrica			C (Correlações)	
	Dp (mmCa)	Vazão (L/min)	Reynolds	C (Experimental)	K (Experimental)	C (Rosemount)	C (Foxboro)	C (ISO 5167)	C (Tb Curve)	C (Ajuste)
Vazão Máxima Experimental	4857,438	4,088	5803	0,613857	0,614623	0,617731	0,637637	0,617039	0,613626	0,614259
Limite Inferior de Reynolds ReD	3650,313	3,547	5035	0,614363	0,615130	0,618994	0,638102	0,617781	0,615309	0,615309
Comparação	------	------	10000	------	------	0,613646	0,636135	0,618665	0,611745	0,610863

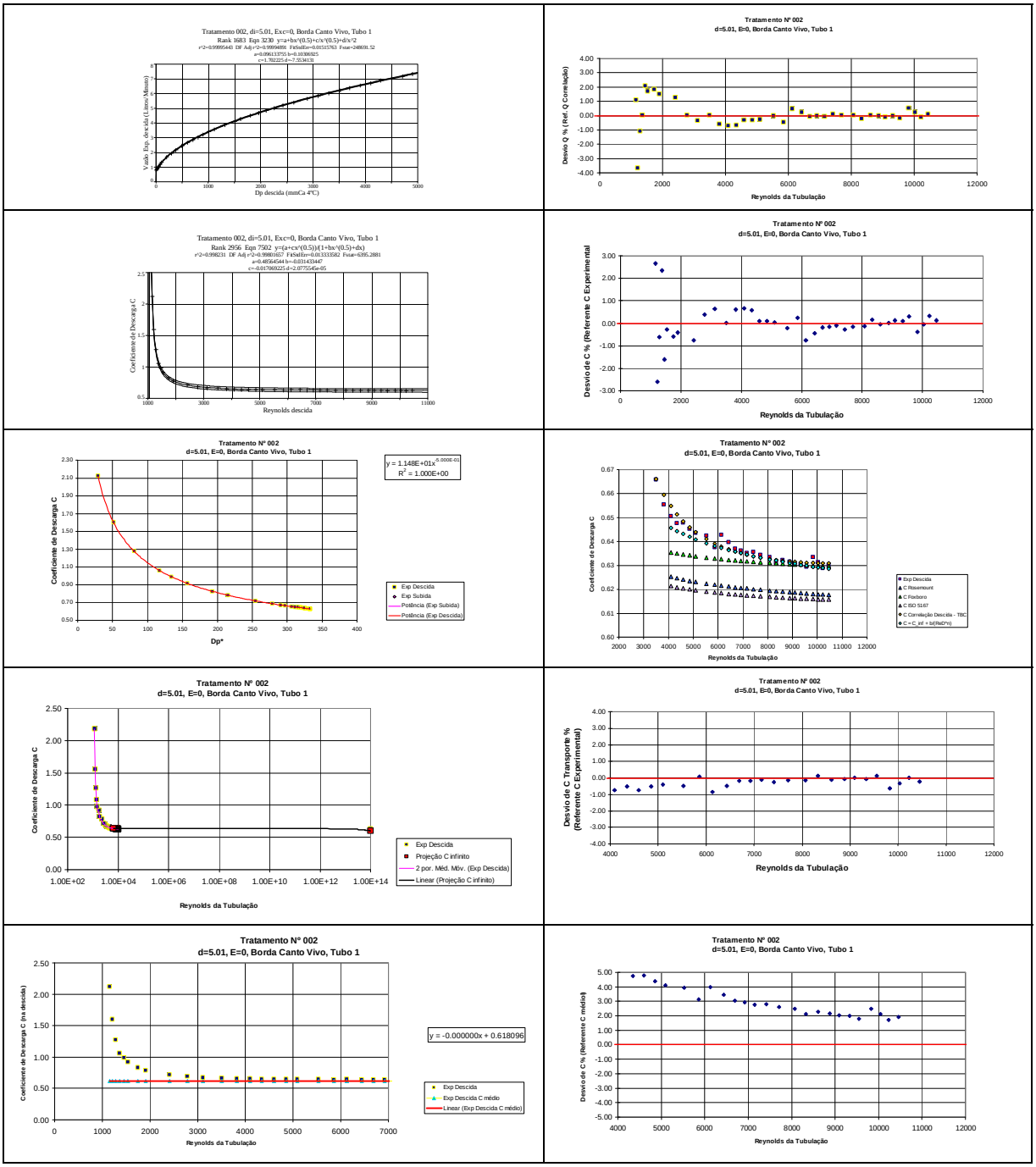


Figura D.2: Gráficos para o Tratamento E002.

Tabela D.2: Tratamento E002.

Condição	Observação			Coeficientes		Coeficientes para Orifício com Borda Canto Vivo e Concêntrica			C (Correlações)	
	Dp (mmCa)	Vazão (L/min)	Reynolds	C (Experimental)	K (Experimental)	C (Rosemount)	C (Foxboro)	C (ISO 5167)	C (Tb Curve)	C (Ajuste)
Vazão Máxima Experimental	4905,375	7,348	10453	0,630023	0,632410	0,617725	0,629703	0,615653	0,630832	0,628561
Limite Inferior de Reynolds	2107,500	4,863	6919	0,636192	0,638602	0,620605	0,631900	0,617714	0,635107	0,635107
ReD Comparação	------	------	10000	------	------	0,618007	0,629918	0,619200	0,630958	0,629202

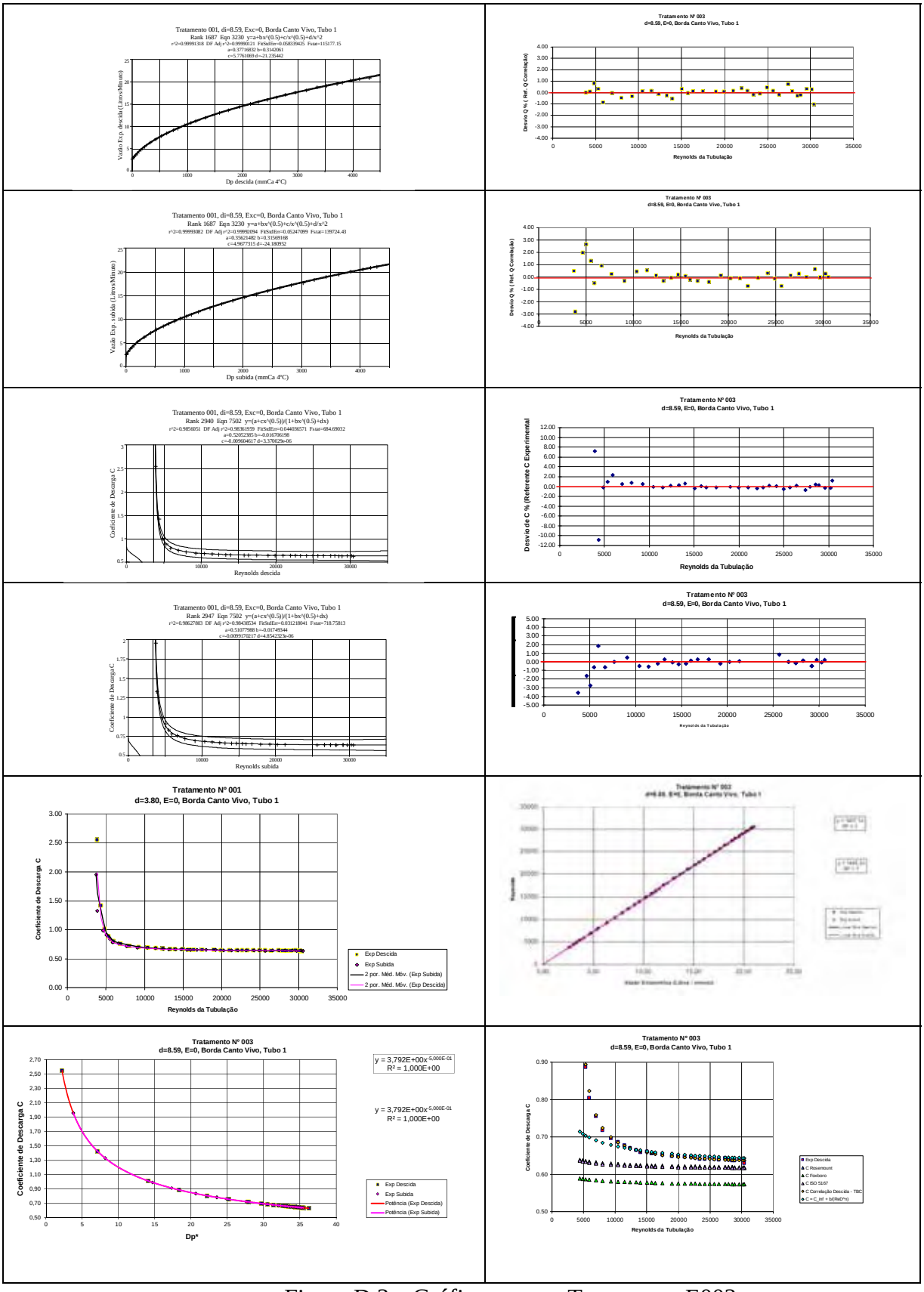


Figura D.3a: Gráficos para o Tratamento E003.

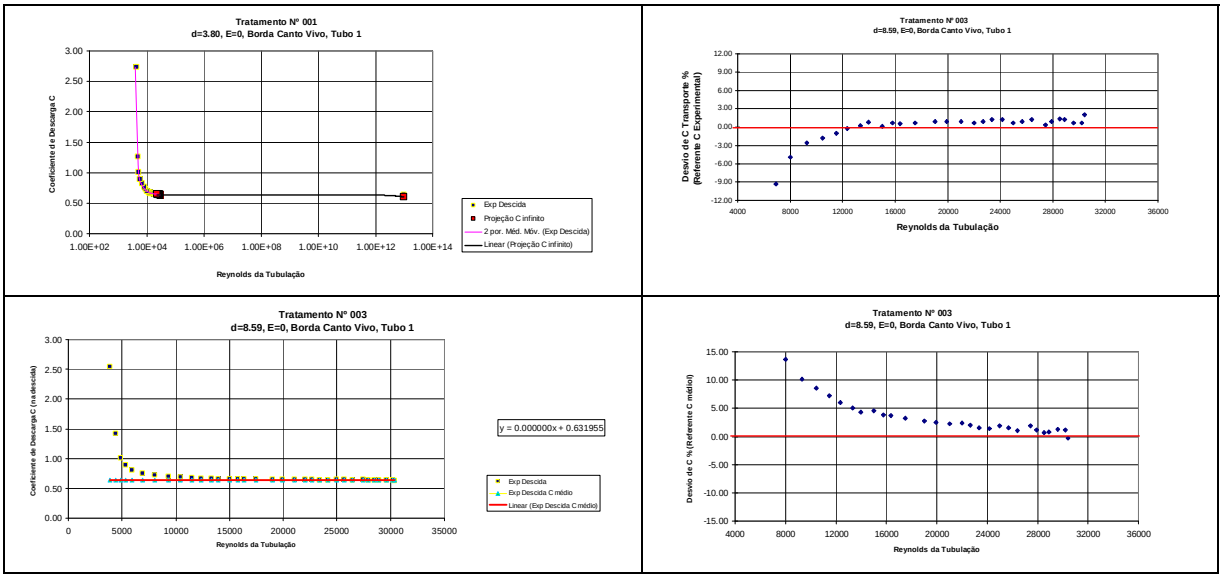


Figura D.3b: Gráficos para o Tratamento E003, continuação.

Tabela D.3: Tratamento E003.

Condição	Observação			Coeficientes		Coeficientes para Orifício com Borda Canto Vivo e Concêntrica			C (Correlações)	
	Dp (mmCa)	Vazão (L/min)	Reynolds	C (Experimental)	K (Experimental)	C (Rosemount)	C (Foxboro)	C (ISO 5167)	C (Tb Curve)	C (Ajuste)
Vazão Máxima Experimental	4306,438	20,862	30397	0,630190	0,651760	0,619081	0,573491	0,616874	0,637492	0,643497
Limite Inferior de Reynolds ReD	745,313	9,143	13322	0,663909	0,686633	0,625252	0,578401	0,622132	0,665704	0,665704
Comparação	------	------	10000	------	------	0,628068	0,580641	0,626578	0,690728	0,675837

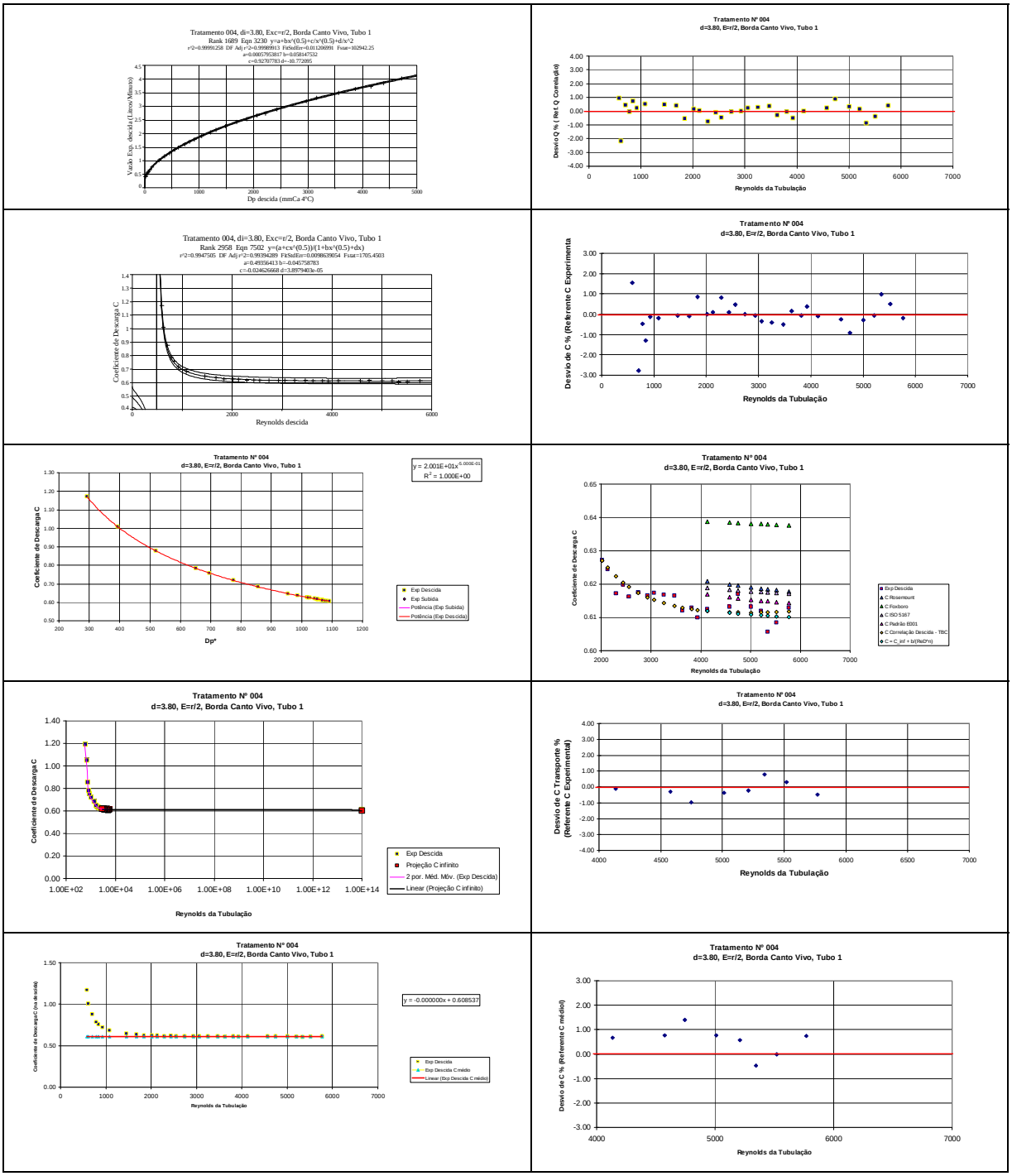


Figura D.4: Gráficos para o Tratamento E004.

Tabela D.4: Tratamento E004.

Condição	Observação			Coeficientes		Coeficientes para Orifício com Borda Canto Vivo e Concêntrica				C (Correlações)	
	Dp (mmCa)	Vazão (L/min)	Reynolds	C (Experimental)	K (Experimental)	C (Rosemount)	C (Foxboro)	C (ISO 5167)	C (Padrão)	C (Tb)	C (Ajuste)
Vazão Máxima Experimental	4729,000	4,028	5768	0,612984	0,613749	0,617784	0,637657	0,617069	0,614300	0,611780	0,610103
Limite Inferior de Reynolds	2435,000	2,888	4136	0,612555	0,613320	0,620896	0,638801	0,618938	0,616887	0,611930	0,611930
ReD Comparação	------	------	10000	------	------	0,613646	0,636135	0,618665	0,610860	0,618032	0,607673

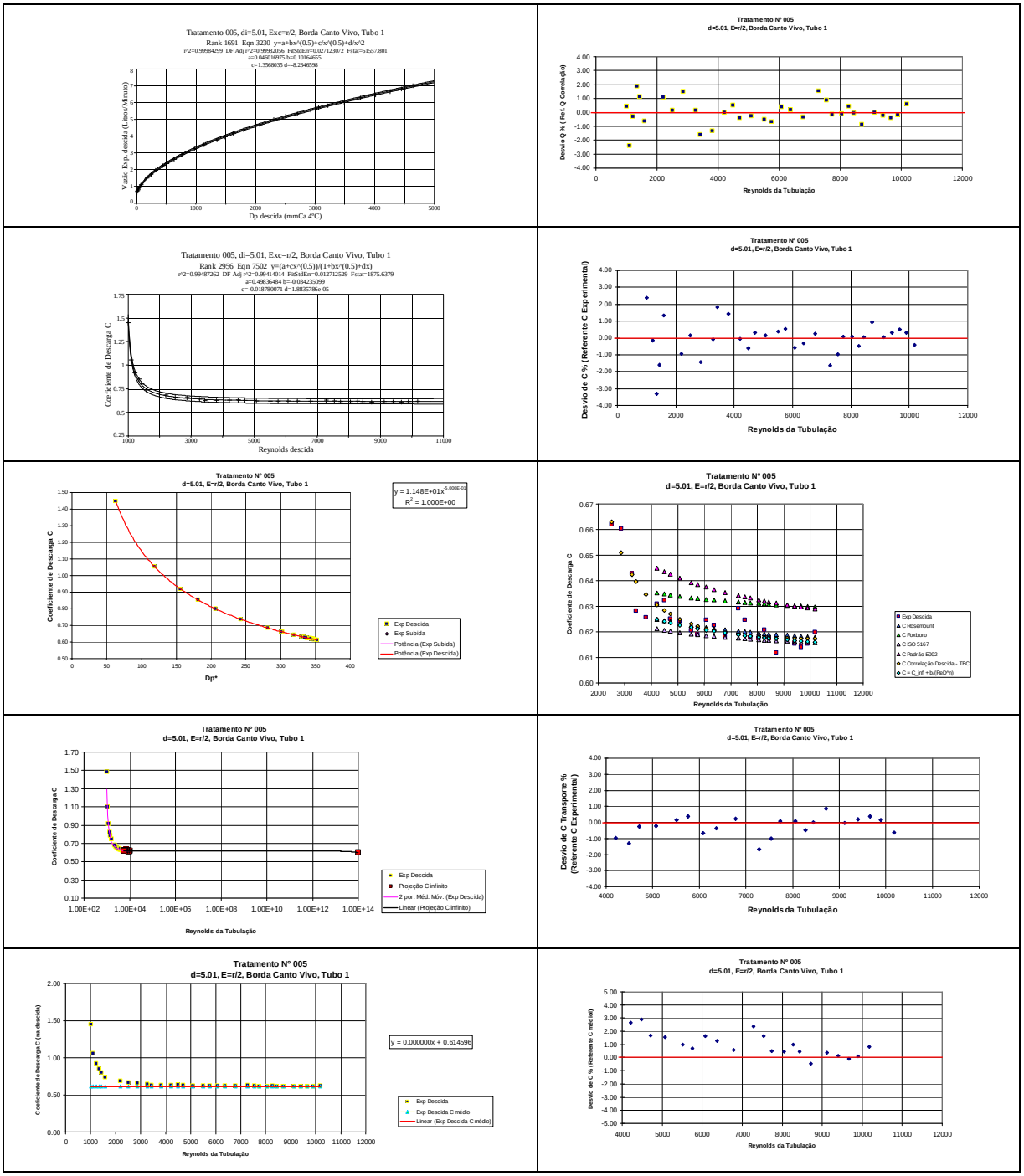


Figura D.5: Gráficos para o Tratamento E005.

Tabela D.5: Tratamento E005.

Condição	Observação			Coeficientes		Coeficientes para Orifício com Borda Canto Vivo e Concêntrica				C (Correlações)	
	Dp (mmCa)	Vazão (L/min)	Reynolds	C (Experimental)	K (Experimental)	C (Rosemount)	C (Foxboro)	C (ISO 5167)	C (Padrão)	C (Tb)	C (Ajuste)
Vazão Máxima Experimental	4648,000	7,037	10183	0,619751	0,622099	0,617890	0,629831	0,615767	0,628936	0,617241	0,615952
Limite Inferior de Reynolds	2307,500	5,033	7284	0,629192	0,631576	0,620212	0,631602	0,617423	0,634212	0,618861	0,618861
ReD Comparação	------	------	10000	------	------	0,618007	0,629919	0,619200	0,629200	0,617248	0,616098

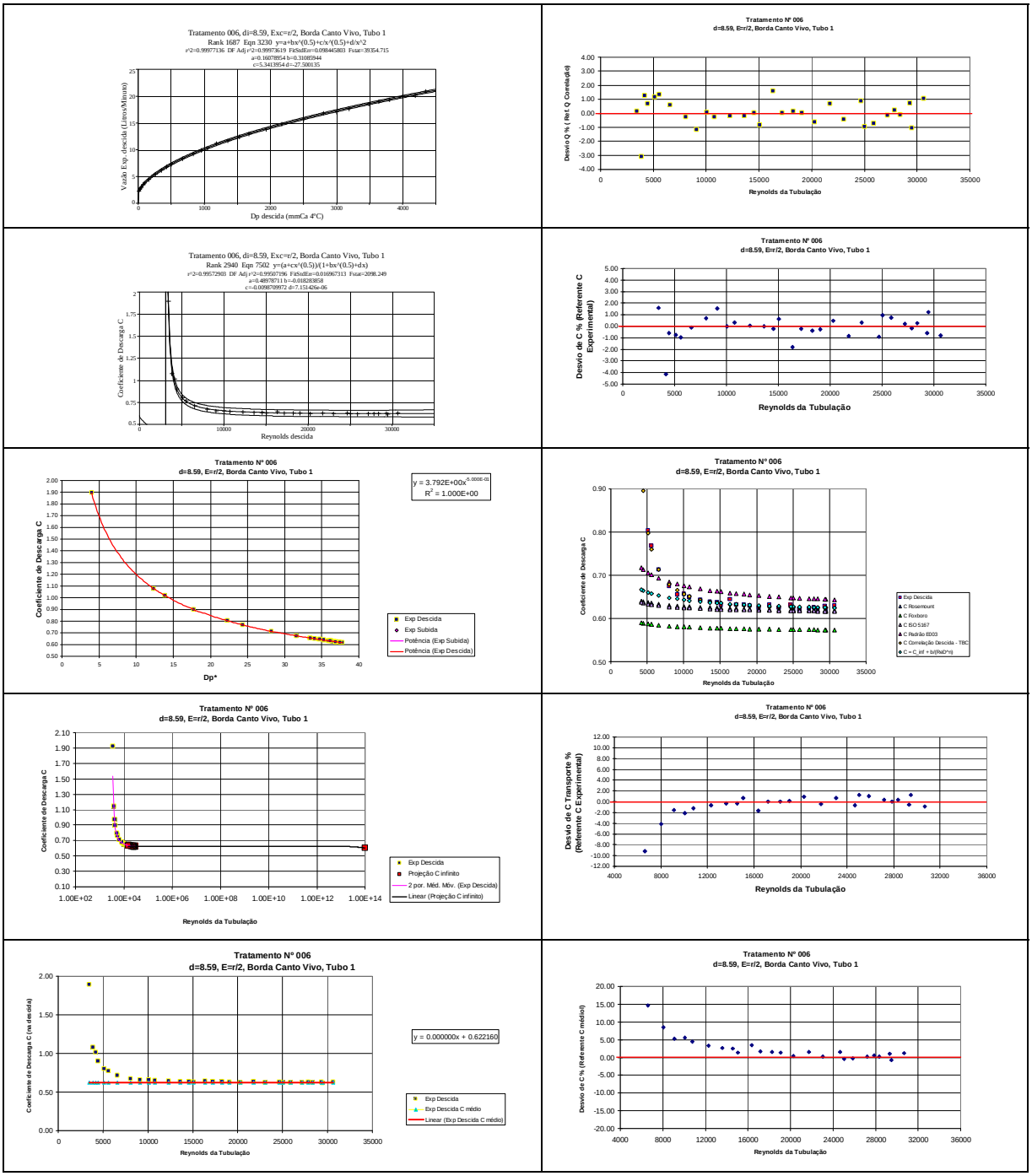


Figura D.6: Gráficos para o Tratamento E006.

Tabela D.6: Tratamento E006.

Condição	Observação			Coeficientes		Coeficientes para Orifício com Borda Canto Vivo e Concêntrica				C (Correlações)	
	Dp (mmCa)	Vazão (L/min)	Reynolds	C (Experimental)	K (Experimental)	C (Rosemount)	C (Foxboro)	C (ISO 5167)	C (Padrão)	C (Tb)	C (Ajuste)
Vazão Máxima Experimental	4352,000	20,963	30661	0,629899	0,651458	0,619029	0,573452	0,616833	0,643312	0,624861	0,624614
Limite Inferior de Reynolds	1049,500	10,311	15081	0,630923	0,652517	0,624154	0,577529	0,621143	0,661756	0,635096	0,635096
ReD Comparação	------	------	10000	------	------	0,628068	0,580643	0,626577	0,675840	0,657064	0,643100

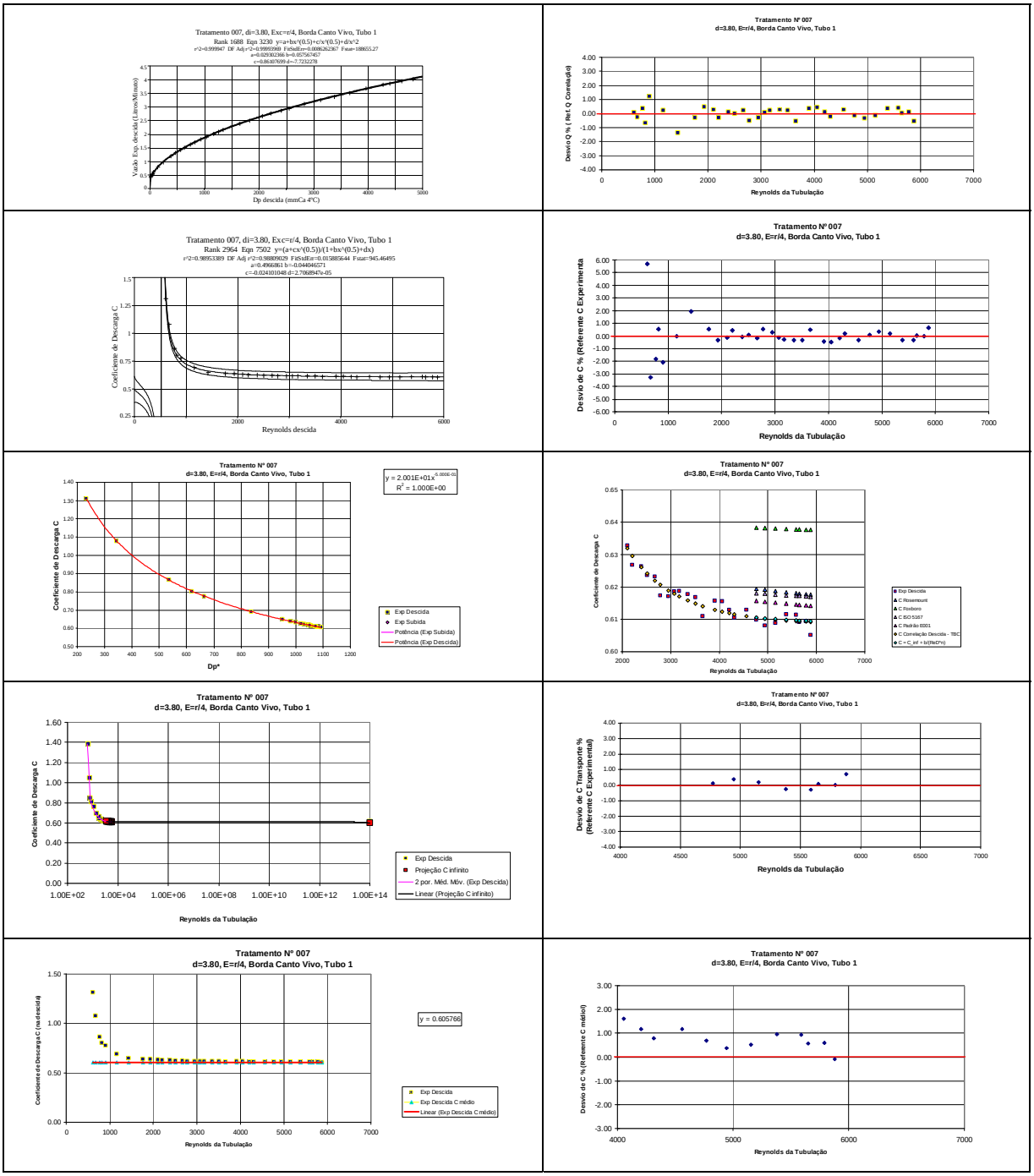


Figura D.7: Gráficos para o Tratamento E007.

Tabela D.7: Tratamento E007.

Condição	Observação			Coeficientes		Coeficientes para Orifício com Borda Canto Vivo e Concêntrica				C (Correlações)	
	Dp (mmCa)	Vazão (L/min)	Reynolds	C (Experimental)	K (Experimental)	C (Rosemount)	C (Foxboro)	C (ISO 5167)	C (Padrão)	C (Tb)	C (Ajuste)
Vazão Máxima Experimental	4830,063	4,020	5880	0,605199	0,605955	0,617619	0,637597	0,616974	0,619001	0,609189	0,609454
Limite Inferior de Reynolds	3129,750	3,261	4770	0,609899	0,610660	0,619498	0,638288	0,618083	0,621097	0,610496	0,610496
ReD Comparação	------	------	10000	------	------	0,613645	0,636136	0,618665	0,614570	0,610542	0,607249

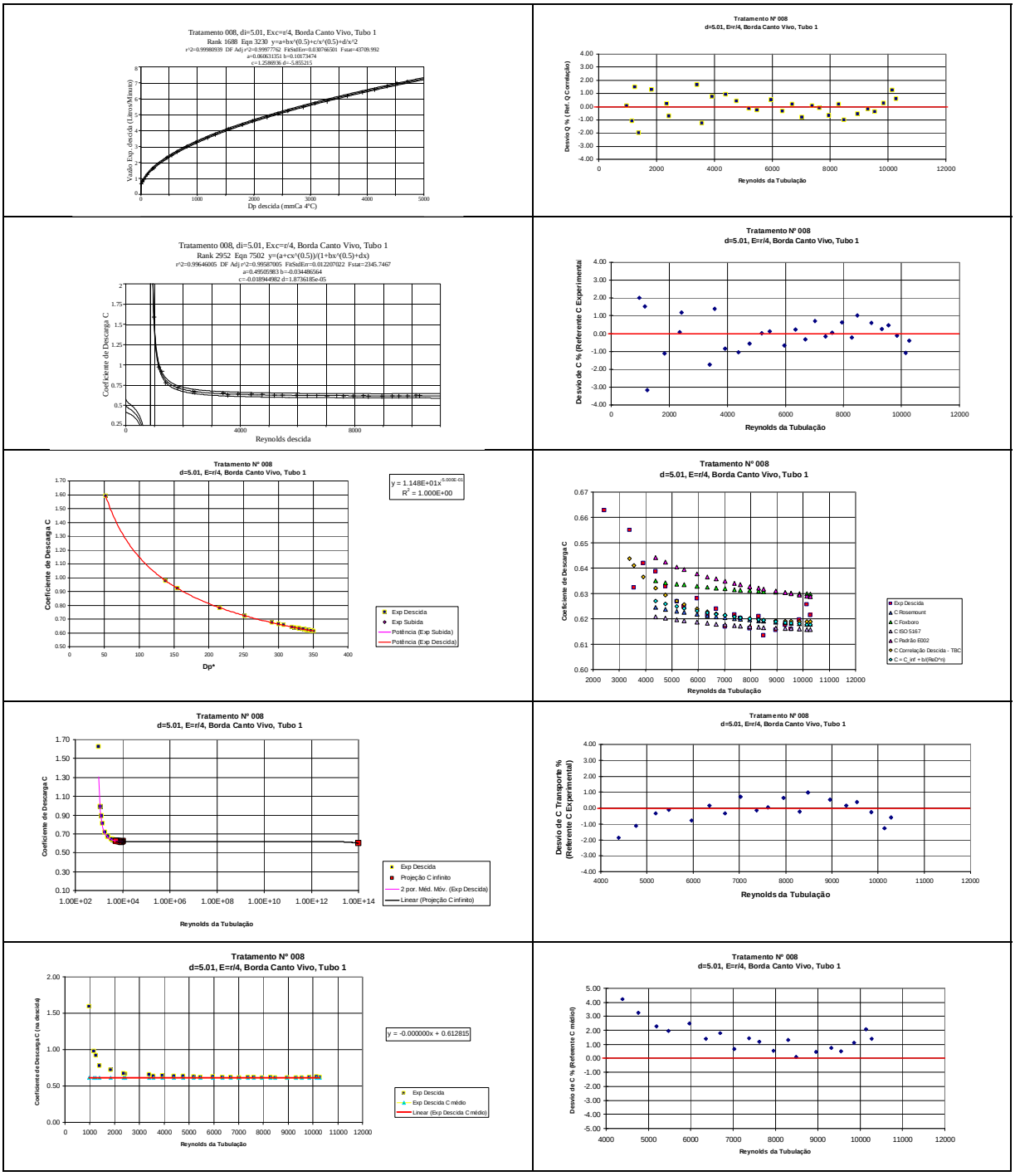


Figura D.8: Gráficos para o Tratamento E008.

Tabela D.8: Tratamento E008.

Condição	Observação			Coeficientes		Coeficientes para Orifício com Borda Canto Vivo e Concêntrica				C (Correlações)	
	Dp (mmCa)	Vazão (L/min)	Reynolds	C (Experimental)	K (Experimental)	C (Rosemount)	C (Foxboro)	C (ISO 5167)	C (Padrão)	C (Tb)	C (Ajuste)
Vazão Máxima Experimental	4709,000	7,101	10277	0,621375	0,623729	0,617832	0,629786	0,615727	0,628804	0,618829	0,617623
Limite Inferior de Reynolds	2233,500	4,856	7027	0,616947	0,619284	0,620485	0,631810	0,617625	0,634833	0,621312	0,621312
ReD Comparação	------	------	10000	------	------	0,618007	0,629919	0,619200	0,629200	0,618866	0,617865

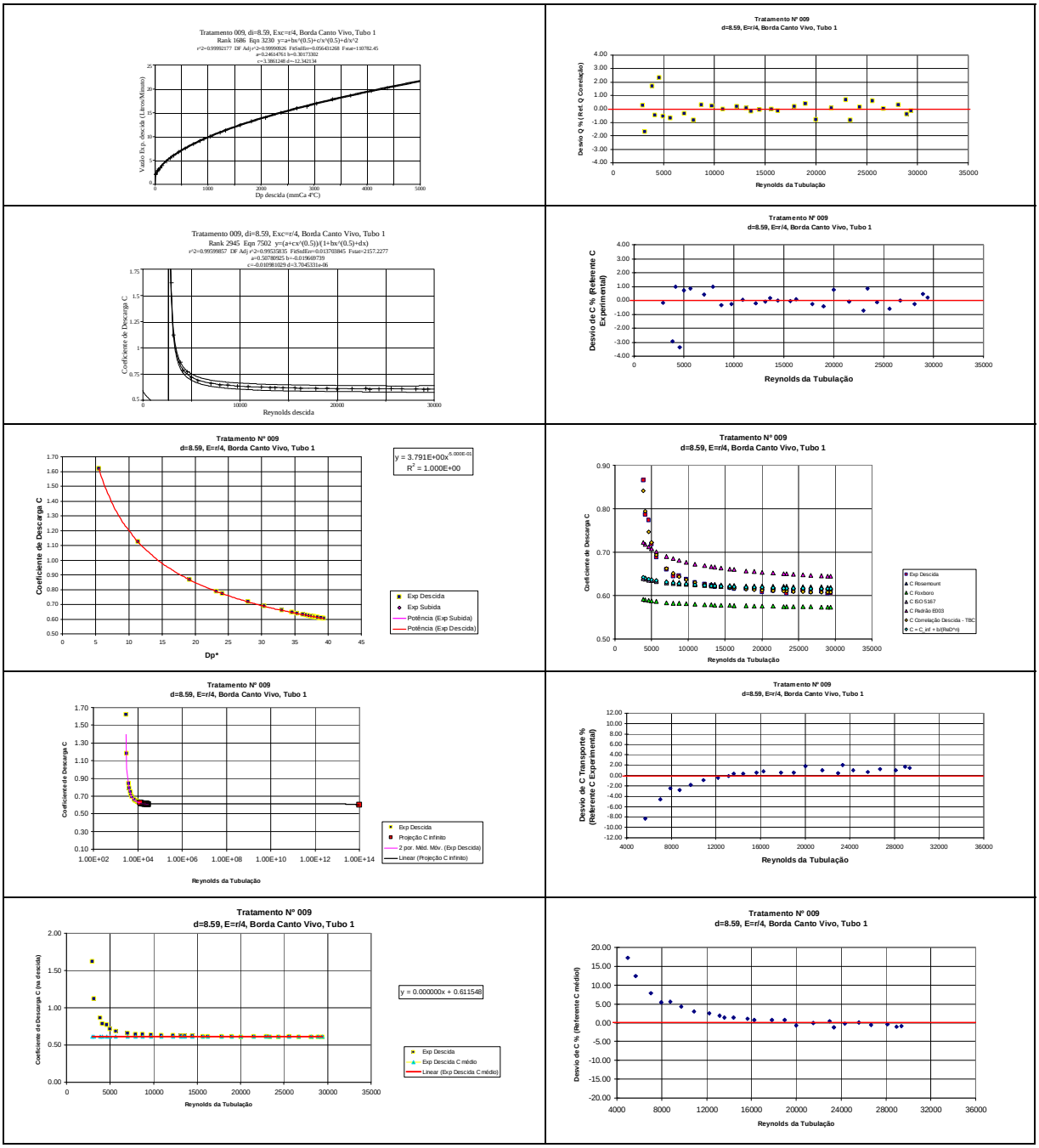


Figura D.9: Gráficos para o Tratamento E009.

Tabela D.9: Tratamento E009.

Condição	Observação			Coeficientes		Coeficientes para Orifício com Borda Canto Vivo e Concêntrica				C (Correlações)	
	Dp (mmCa)	Vazão (L/min)	Reynolds	C (Experimental)	K (Experimental)	C (Rosemount)	C (Foxboro)	C (ISO 5167)	C (Padrão)	C (Tb)	C (Ajuste)
Vazão Máxima Experimental	4503,000	20,519	29380	0,606232	0,626984	0,619290	0,573646	0,617040	0,644246	0,607426	0,615143
Limite Inferior de Reynolds	852,500	9,176	13139	0,623097	0,644427	0,625381	0,578491	0,622249	0,666163	0,622644	0,622644
ReD Comparação	------	------	10000	------	------	0,628070	0,580630	0,626579	0,675840	0,634773	0,625956

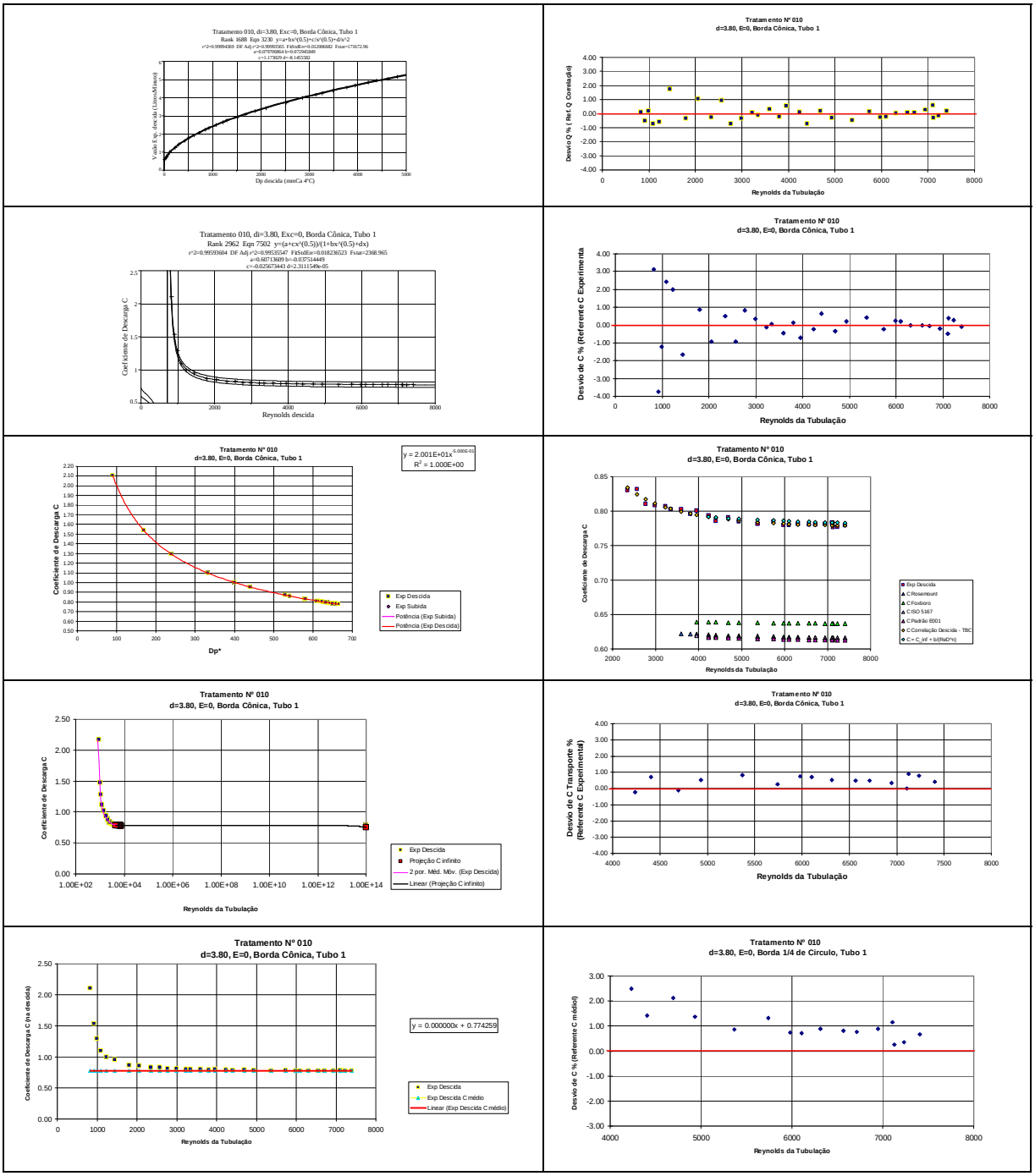


Figura D.10: Gráficos para o Tratamento E010.

Tabela D.10: Tratamento E010.

Condição	Observação			Coeficientes		Coeficientes para Orifício com Borda Canto Vivo e Concêntrica				C (Correlações)	
	Dp (mmCa)	Vazão (L/min)	Reynolds	C (Experimental)	K (Experimental)	C (Rosemount)	C (Foxboro)	C (ISO 5167)	C (Padrão)	C (Tb)	C (Ajuste)
Vazão Máxima Experimental	4818,500	5,170	7403	0,779478	0,780452	0,615765	0,636914	0,615926	0,616933	0,778841	0,782757
Limite Inferior de Reynolds ReD	1522,000	2,958	4236	0,793519	0,794510	0,620655	0,638713	0,618789	0,622387	0,791696	0,791696
Comparação	------	------	10000	------	------	0,613646	0,636135	0,618665	0,614570	0,777758	0,778883

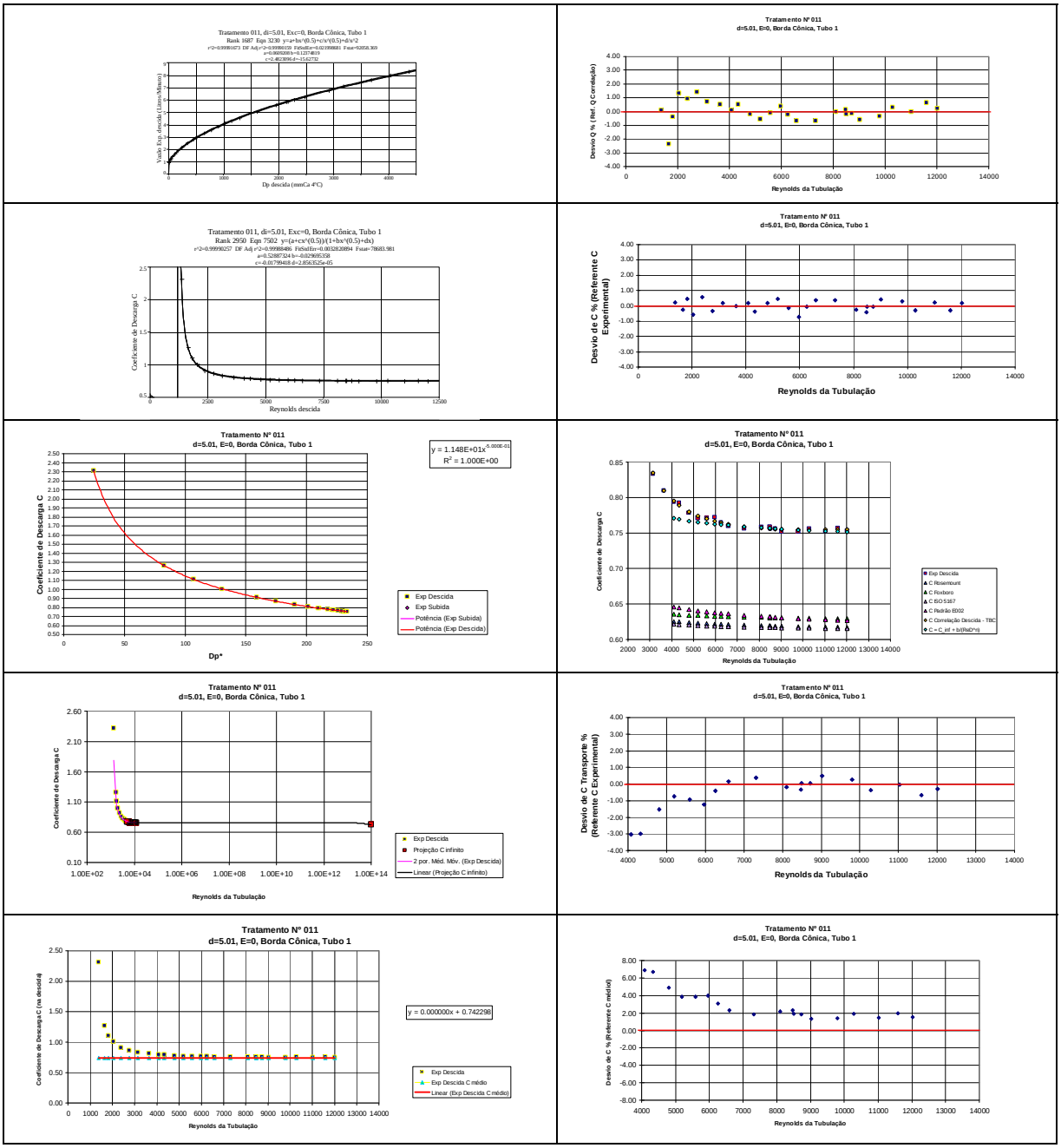


Figura D.11: Gráficos para o Tratamento E011.

Tabela D.11: Tratamento E011.

Condição	Observação			Coeficientes		Coeficientes para Orifício com Borda Canto Vivo e Concêntrica				C (Correlações)	
	Dp (mmCa)	Vazão (L/min)	Reynolds	C (Experimental)	K (Experimental)	C (Rosemount)	C (Foxboro)	C (ISO 5167)	C (Padrão)	C (Tb)	C (Ajuste)
Vazão Máxima Experimental	4377,000	8,304	12018	0,753711	0,756566	0,616878	0,629059	0,615079	0,626636	0,755059	0,751536
Limite Inferior de Reynolds	1613,000	5,057	7319	0,756137	0,759001	0,620176	0,631574	0,617397	0,634131	0,759003	0,759003
ReD Comparação	------	------	10000	------	------	0,618007	0,629919	0,619200	0,629200	0,754525	0,754090

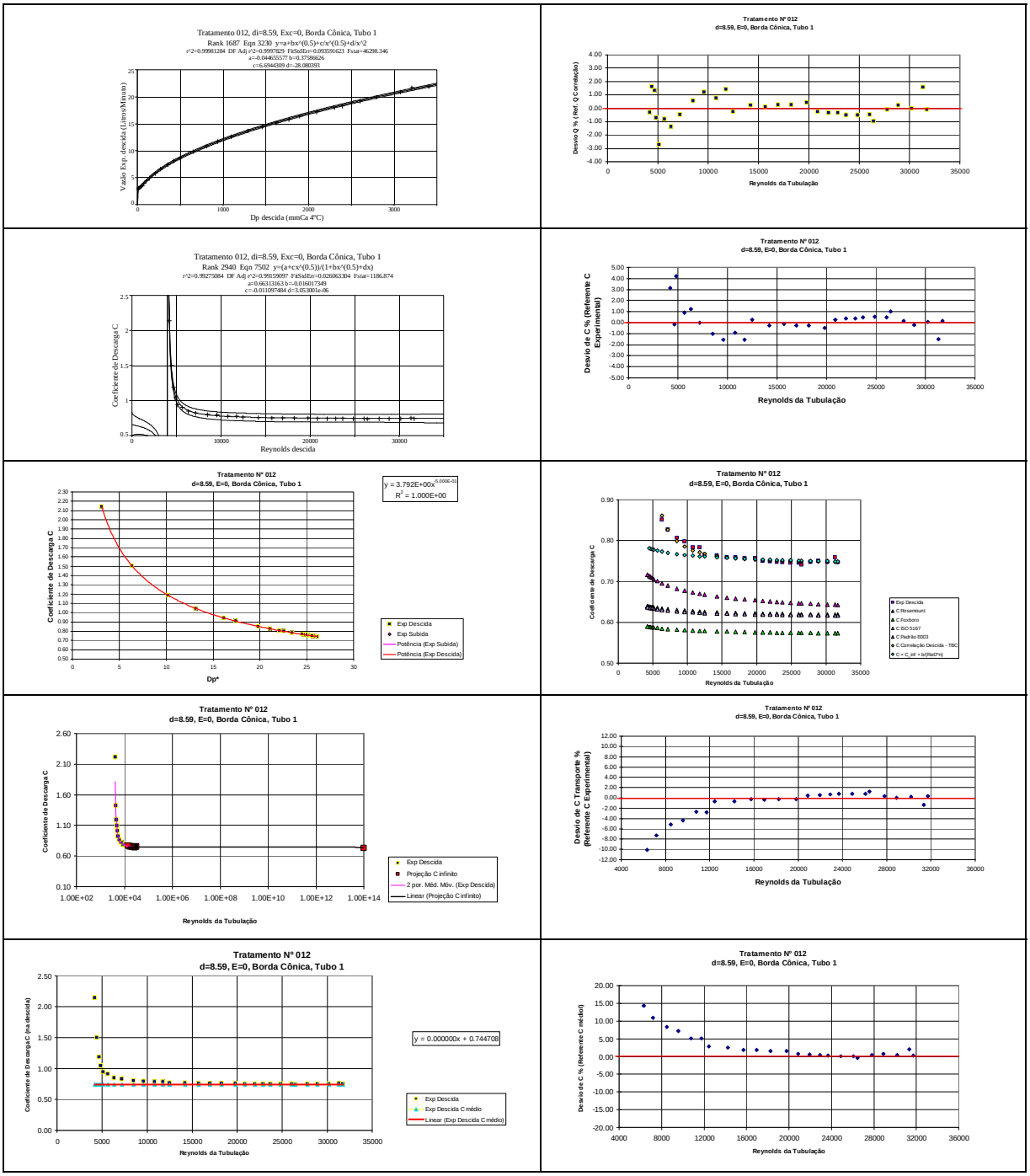


Figura D.12: Gráficos para o Tratamento E012.

Tabela D.12: Tratamento E012.

Condição	Observação			Coeficientes		Coeficientes para Orifício com Borda Canto Vivo e Concêntrica				C (Correlações)	
	Dp (mmCa)	Vazão (L/min)	Reynolds	C (Experimental)	K (Experimental)	C (Rosemount)	C (Foxboro)	C (ISO 5167)	C (Padrão)	C (Tb)	C (Ajuste)
Vazão Máxima Experimental	3406,250	21,982	31736	0,746682	0,772241	0,618824	0,573281	0,616671	0,642572	0,747972	0,749196
Limite Inferior de Reynolds	943,000	11,747	16960	0,758382	0,784341	0,623177	0,576743	0,620283	0,658235	0,756259	0,756259
ReD Comparação	------	------	10000	------	------	0,628069	0,580635	0,626578	0,675840	0,781885	0,764197

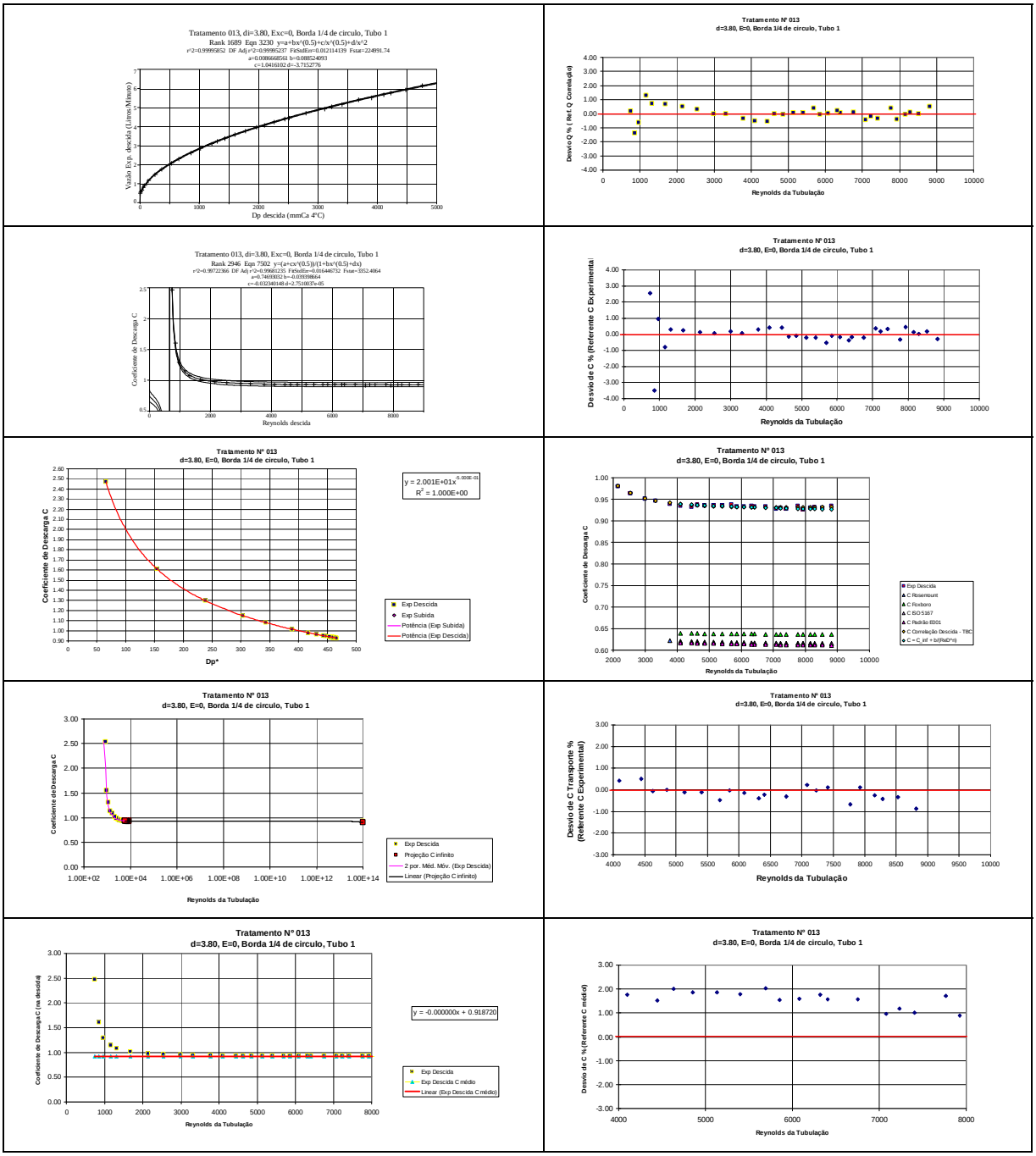


Figura D.13: Gráficos para o Tratamento E013.

Tabela D.13: Tratamento E013.

Condição	Observação			Coeficientes		Coeficientes para Orifício com Borda Canto Vivo e Concêntrica				C (Correlações)	
	Dp (mmCa)	Vazão (L/min)	Reynolds	C (Experimental)	K (Experimental)	C (Rosemount)	C (Foxboro)	C (ISO 5167)	C (Padrão)	C (Tb)	C (Ajuste)
Vazão Máxima Experimental	4756,500	6,159	8819	0,934597	0,935765	0,614493	0,636447	0,615235	0,615515	0,931966	0,926541
Limite Inferior de Reynolds ReD	1028,045	2,864	4102	0,934927	0,936095	0,620981	0,638833	0,618991	0,622750	0,938919	0,938919
Comparação	------	------	10000	------	------	0,613646	0,636135	0,618665	0,614570	0,933322	0,924925

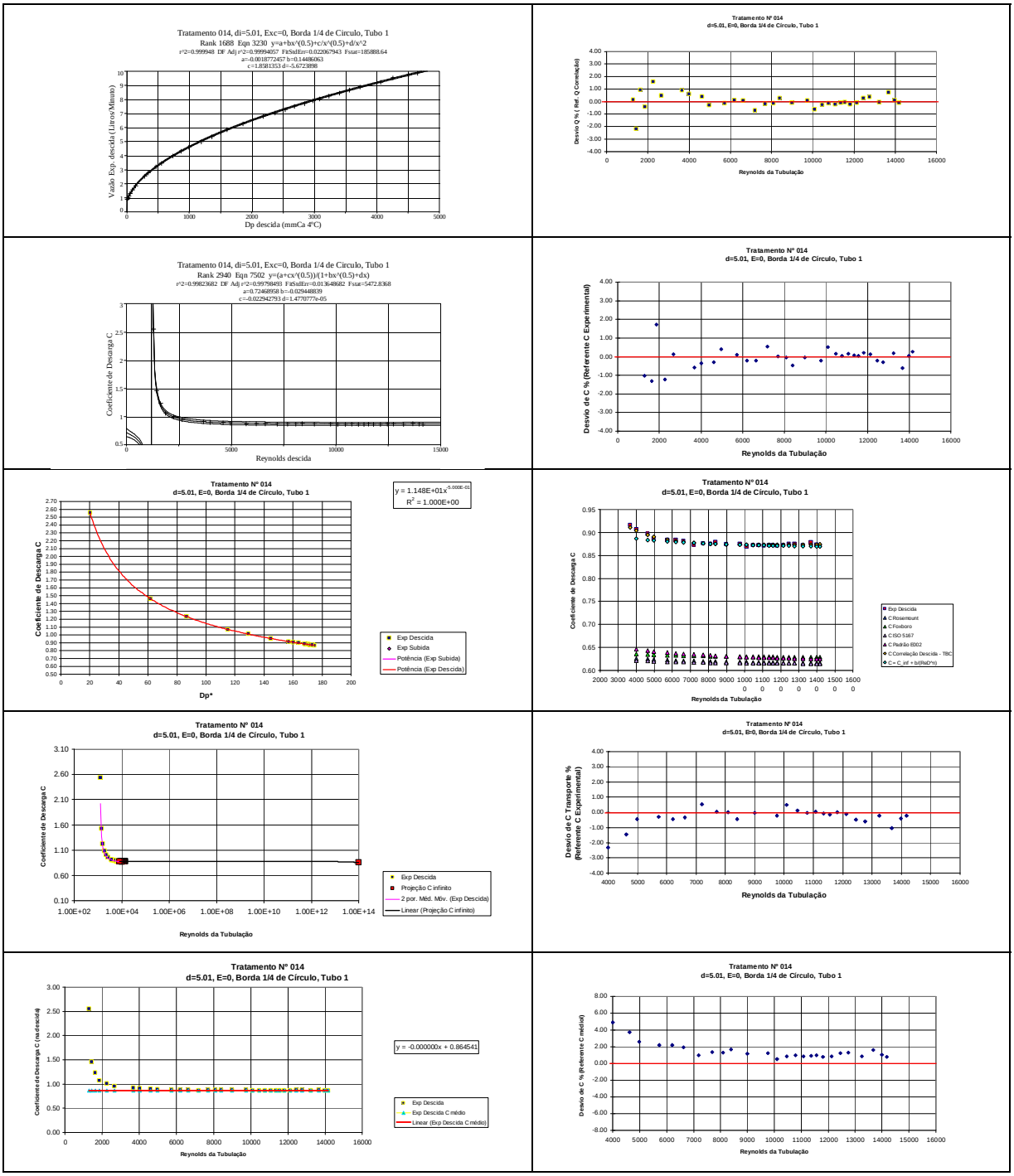


Figura D.14: Gráficos para o Tratamento E014.

Tabela D.14: Tratamento E014.

Condição	Observação			Coeficientes		Coeficientes para Orifício com Borda Canto Vivo e Concêntrica				C (Correlações)	
	Dp (mmCa)	Vazão (L/min)	Reynolds	C (Experimental)	K (Experimental)	C (Rosemount)	C (Foxboro)	C (ISO 5167)	C (Padrão)	C (Tb)	C (Ajuste)
Vazão Máxima Experimental	4649,955	9,895	14169	0,871430	0,874731	0,615952	0,628351	0,614470	0,624531	0,873769	0,869402
Limite Inferior de Reynolds	1359,000	5,378	7701	0,876095	0,879413	0,619800	0,631286	0,617121	0,633275	0,876318	0,876318
ReD Comparação	------	------	10000	------	------	0,618007	0,629919	0,619200	0,629200	0,873364	0,873095

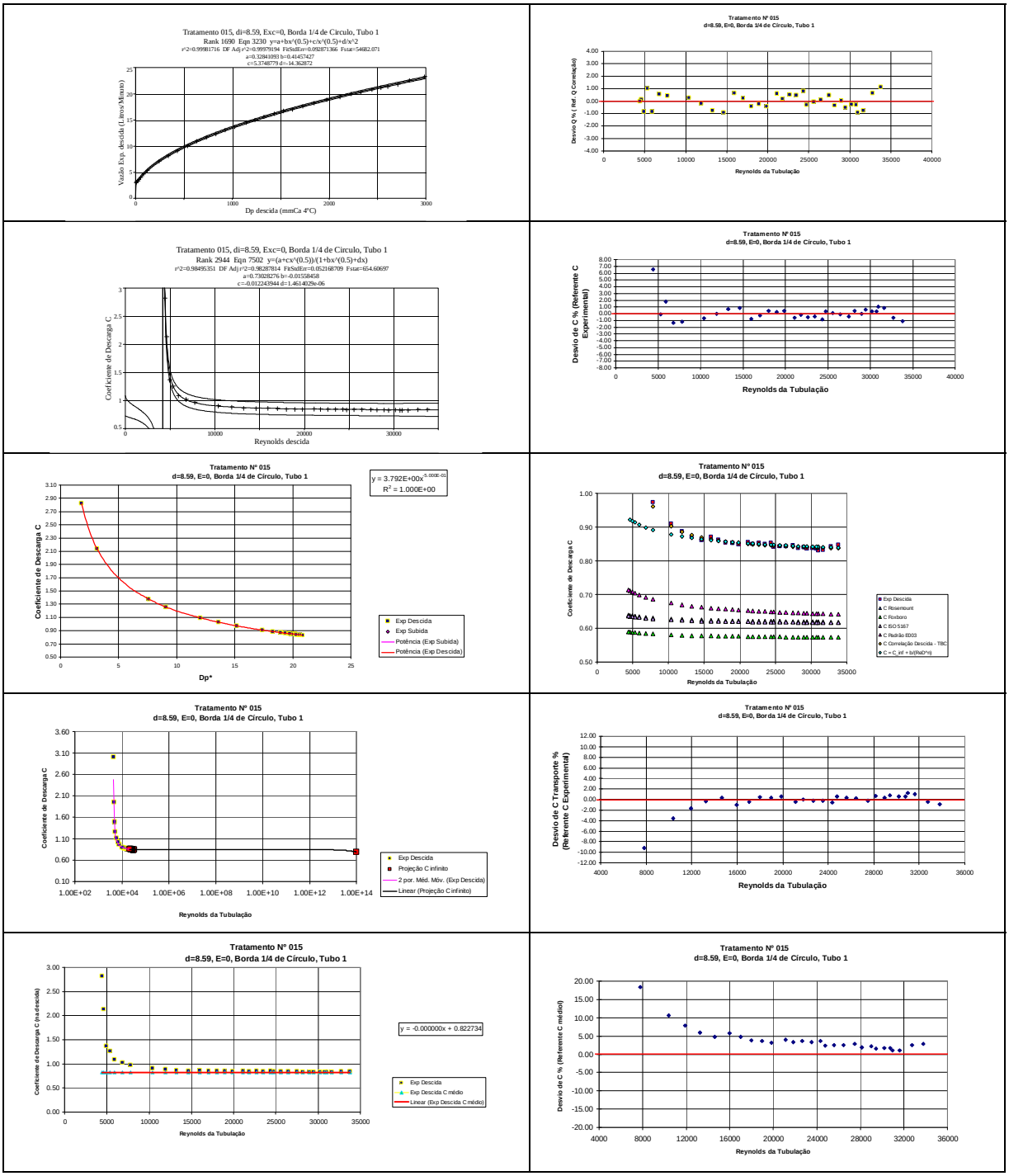


Figura D.15: Gráficos para o Tratamento E015.

Tabela D.15: Tratamento E015.

Condição	Observação			Coeficientes		Coeficientes para Orifício com Borda Canto Vivo e Concêntrica				C (Correlações)	
	Dp (mmCa)	Vazão (L/min)	Reynolds	C (Experimental)	K (Experimental)	C (Rosemount)	C (Foxboro)	C (ISO 5167)	C (Padrão)	C (Tb)	C (Ajuste)
Vazão Máxima Experimental	2988,938	23,350	33793	0,846712	0,875695	0,618458	0,572991	0,616383	0,641256	0,837509	0,838944
Limite Inferior de Reynolds ReD	834,250	12,437	17999	0,853622	0,882841	0,622703	0,576368	0,619872	0,656530	0,857064	0,857064
Comparação	------	------	10000	------	------	0,628069	0,580637	0,626578	0,675840	0,908553	0,879972

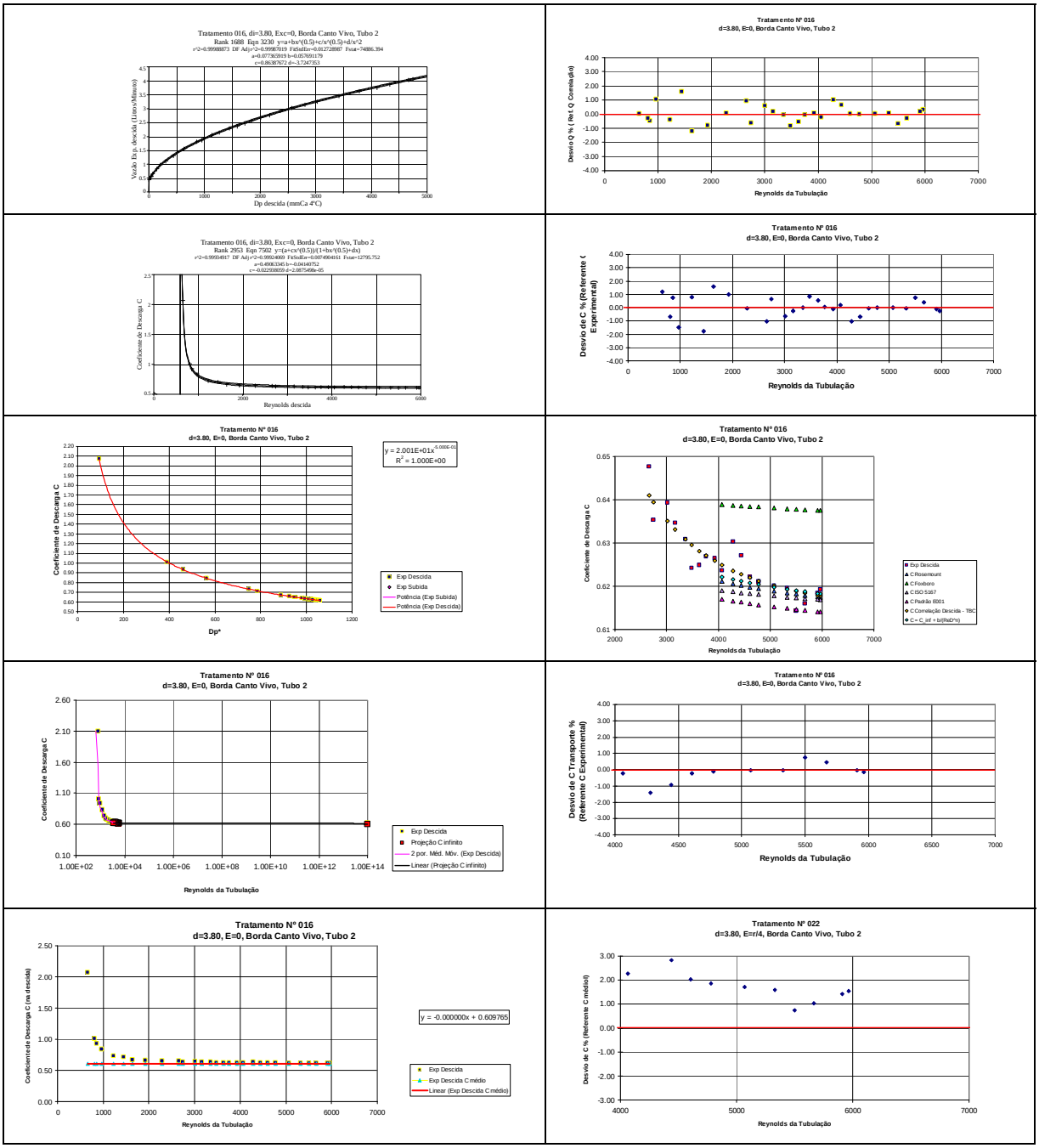


Figura D.16: Gráficos para o Tratamento E016.

Tabela D.16: Tratamento E016.

Condição	Observação			Coeficientes		Coeficientes para Orifício com Borda Canto Vivo e Concêntrica				C (Correlações)	
	Dp (mmCa)	Vazão (L/min)	Reynolds	C (Experimental)	K (Experimental)	C (Rosemount)	C (Foxboro)	C (ISO 5167)	C (Padrão)	C (Tb)	C (Ajuste)
Vazão Máxima Experimental	4747,500	4,077	5964	0,619185	0,619958	0,617498	0,637553	0,616904	0,614063	0,617768	0,618270
Limite Inferior de Reynolds ReD	3784,375	3,642	5328	0,619530	0,620304	0,618480	0,637914	0,617476	0,614879	0,619331	0,619331
Comparação	------	------	10000	------	------	0,613645	0,636136	0,618665	0,610860	0,614998	0,614110

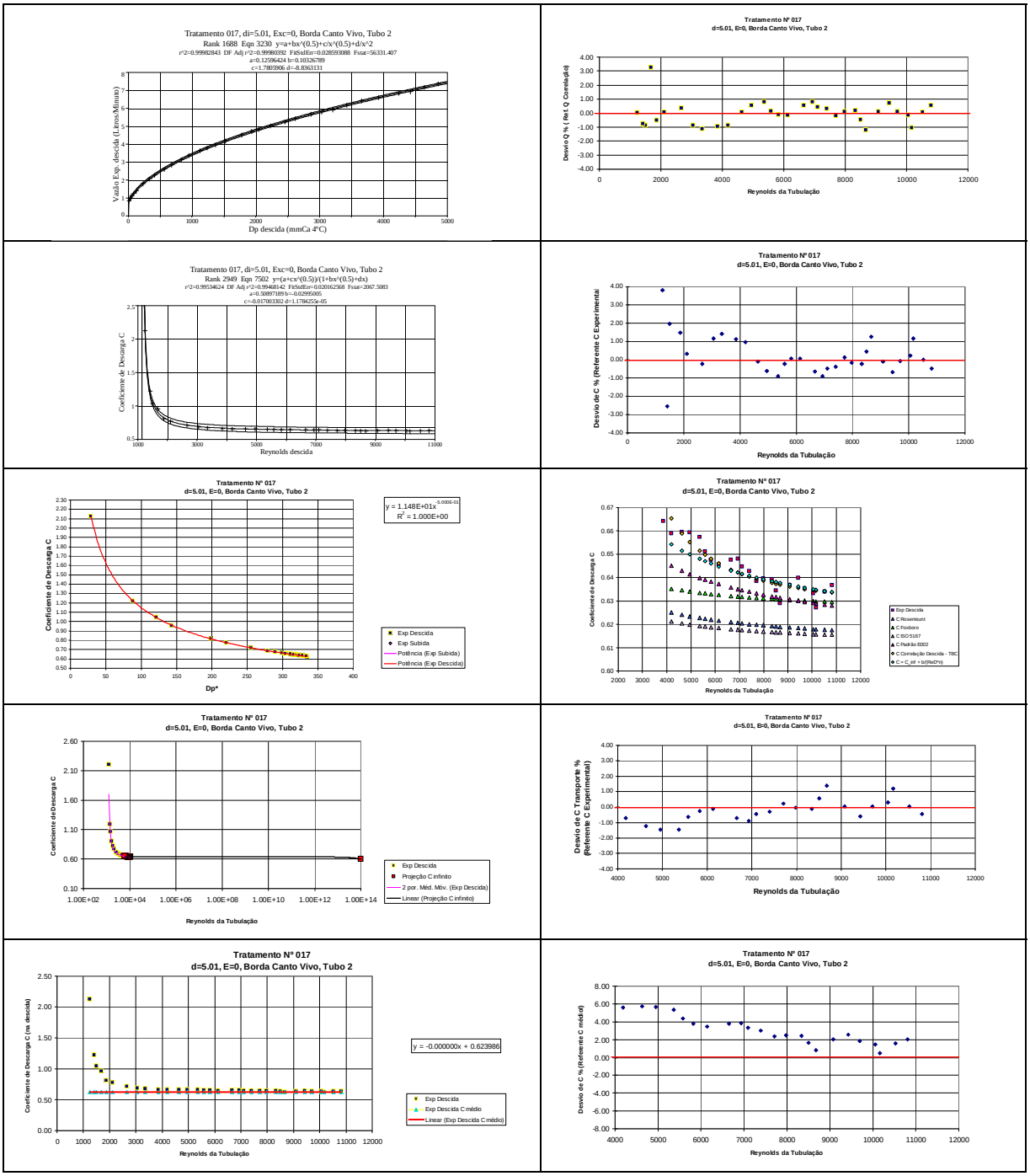


Figura D.17: Gráficos para o Tratamento E017.

Tabela D.17: Tratamento E017.

Condição	Observação			Coeficientes		Coeficientes para Orifício com Borda Canto Vivo e Concêntrica				C (Correlações)	
	Dp (mmCa)	Vazão (L/min)	Reynolds	C (Experimental)	K (Experimental)	C (Rosemount)	C (Foxboro)	C (ISO 5167)	C (Padrão)	C (Tb)	C (Ajuste)
Vazão Máxima Experimental	4859,875	7,393	10813	0,636718	0,639129	0,617514	0,629544	0,615509	0,628081	0,633698	0,633765
Limite Inferior de Reynolds	1933,000	4,745	6940	0,647973	0,650427	0,620581	0,631884	0,617696	0,635051	0,642146	0,642146
ReD Comparação	------	------	10000	------	------	0,618006	0,629920	0,619200	0,629200	0,634659	0,635110

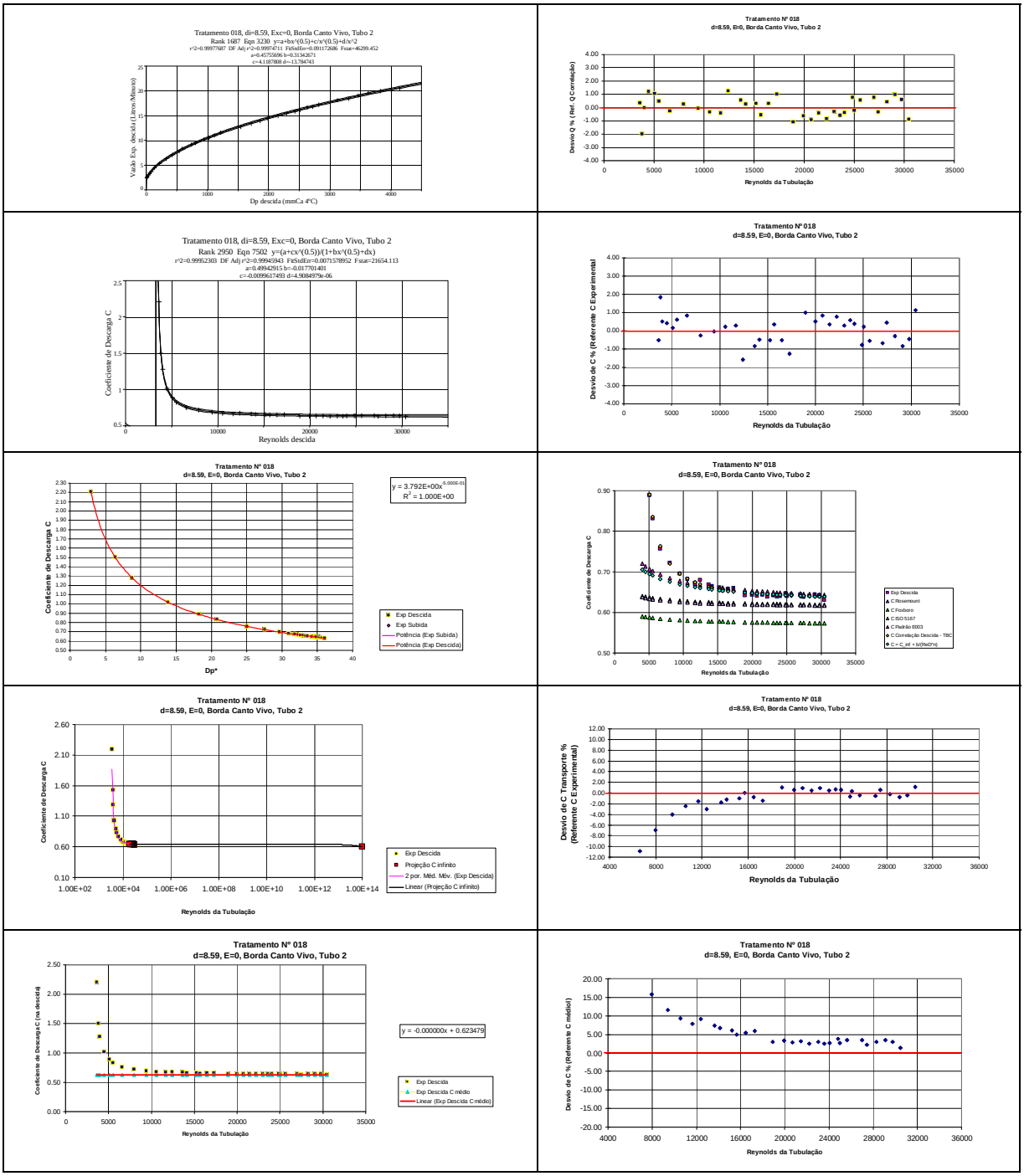


Figura D.18: Gráficos para o Tratamento E018.

Tabela D.18: Tratamento E018.

Condição	Observação			Coeficientes		Coeficientes para Orifício com Borda Canto Vivo e Concêntrica				C (Correlações)	
	Dp (mmCa)	Vazão (L/min)	Reynolds	C (Experimental)	K (Experimental)	C (Rosemount)	C (Foxboro)	C (ISO 5167)	C (Padrão)	C (Tb)	C (Ajuste)
Vazão Máxima Experimental	4145,000	20,517	30454	0,631647	0,653263	0,619068	0,573492	0,616865	0,643458	0,638793	0,638547
Limite Inferior de Reynolds	1547,438	12,752	18928	0,642505	0,664492	0,622310	0,576072	0,619536	0,655125	0,648896	0,648896
ReD Comparação	------	------	10000	------	------	0,628066	0,580652	0,626576	0,675840	0,688915	0,667270

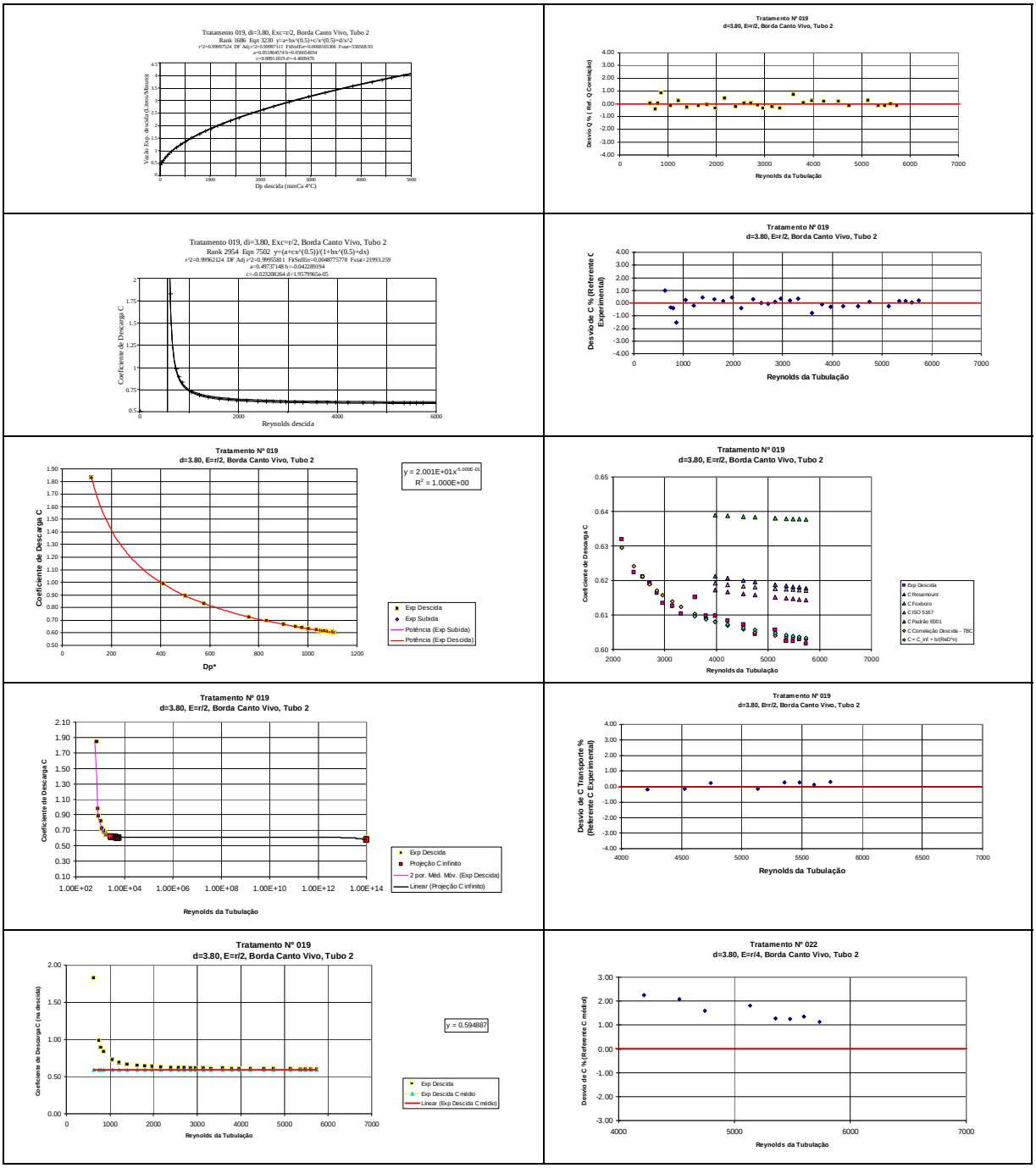


Figura D.19: Gráficos para o Tratamento E019.

Tabela D.19: Tratamento E019.

Condição	Observação			Coeficientes		Coeficientes para Orifício com Borda Canto Vivo e Concêntrica				C (Correlações)	
	Dp (mmCa)	Vazão (L/min)	Reynolds	C (Experimental)	K (Experimental)	C (Rosemount)	C (Foxboro)	C (ISO 5167)	C (Padrão)	C (Tb)	C (Ajuste)
Vazão Máxima Experimental	4858,313	4,007	5735	0,601606	0,602357	0,617832	0,637675	0,617097	0,619239	0,602884	0,603371
Limite Inferior de Reynolds	2266,625	2,774	3971	0,609773	0,610535	0,621314	0,638955	0,619199	0,623122	0,608088	0,608088
ReD Comparação	------	------	10000	------	------	0,613646	0,636135	0,618665	0,614570	0,601181	0,597699

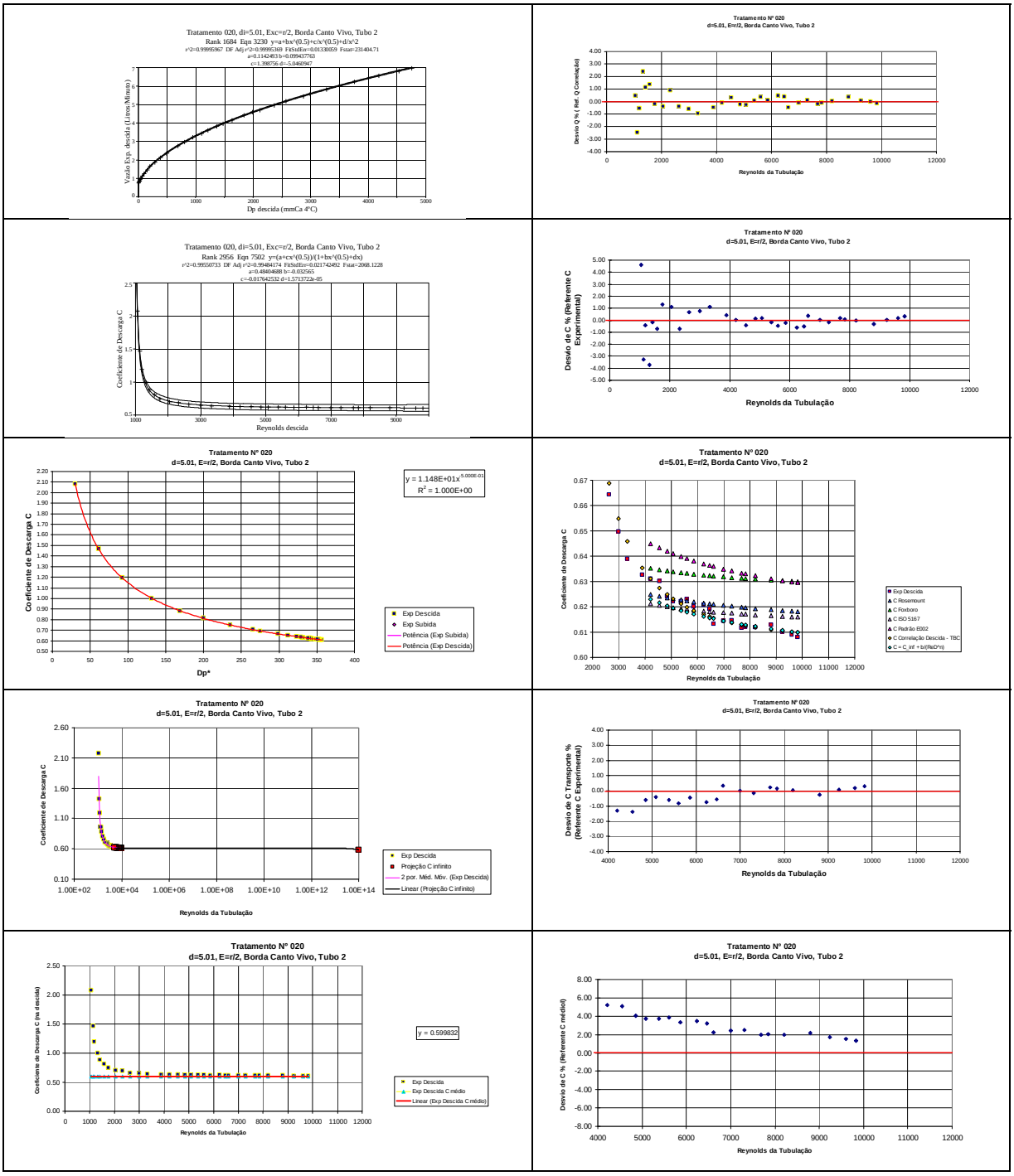


Figura D.20: Gráficos para o Tratamento E020.

Tabela D.20: Tratamento E020.

Condição	Observação			Coeficientes		Coeficientes para Orifício com Borda Canto Vivo e Concêntrica				C (Correlações)	
	Dp (mmCa)	Vazão (L/min)	Reynolds	C (Experimental)	K (Experimental)	C (Rosemount)	C (Foxboro)	C (ISO 5167)	C (Padrão)	C (Tb)	C (Ajuste)
Vazão Máxima Experimental	4759,063	6,983	9824	0,607969	0,610273	0,618122	0,630005	0,615927	0,629460	0,609938	0,609833
Limite Inferior de Reynolds	2366,000	4,975	7000	0,614354	0,616682	0,620516	0,631831	0,617648	0,634901	0,614420	0,614420
ReD Comparação	------	------	10000	------	------	0,618007	0,629918	0,619200	0,629200	0,609807	0,609614

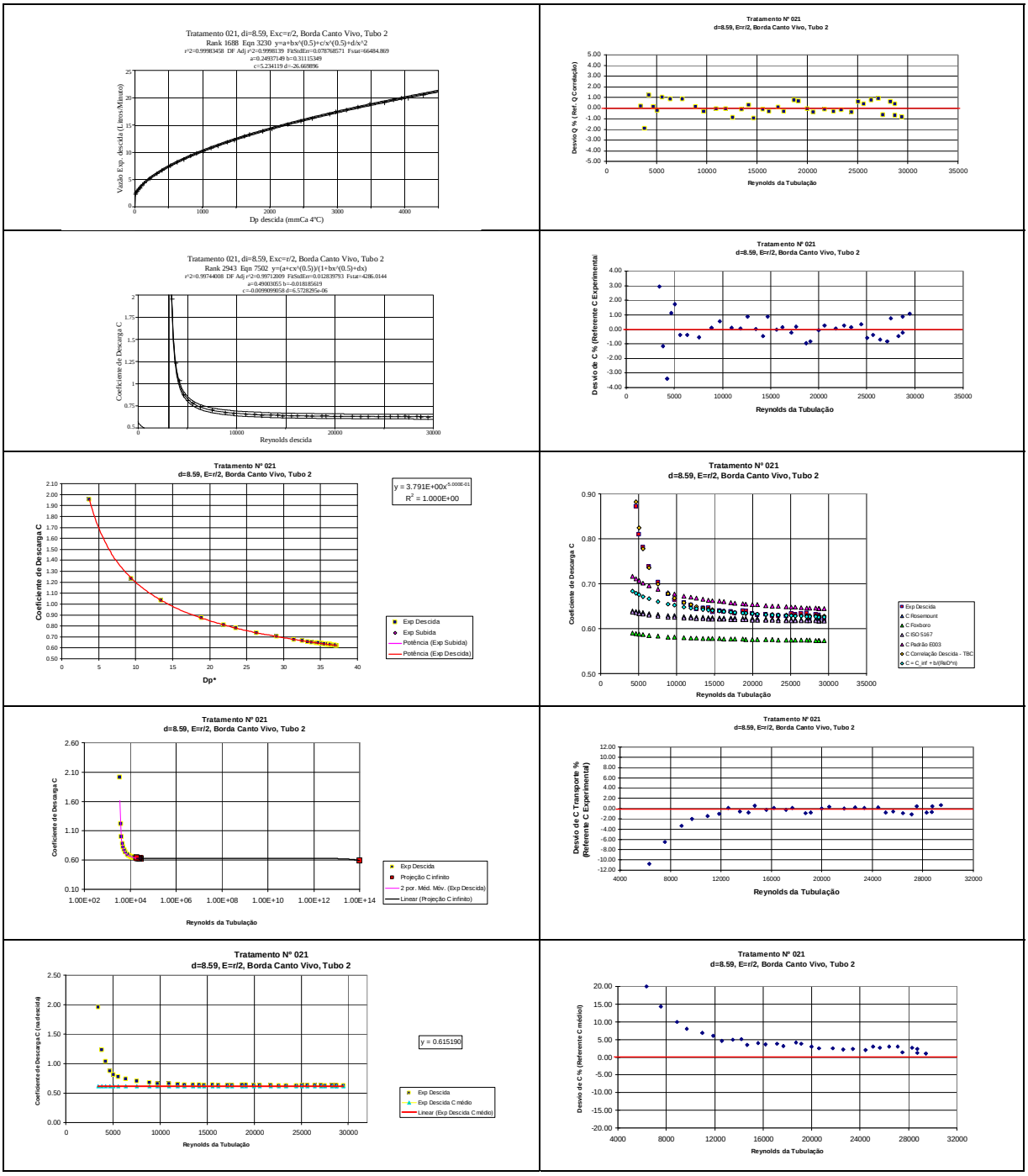


Figura D.21: Gráficos para o Tratamento E021.

Tabela D.21: Tratamento E021.

Condição	Observação			Coeficientes		Coeficientes para Orifício com Borda Canto Vivo e Concêntrica				C (Correlações)	
	Dp (mmCa)	Vazão (L/min)	Reynolds	C (Experimental)	K (Experimental)	C (Rosemount)	C (Foxboro)	C (ISO 5167)	C (Padrão)	C (Tb)	C (Ajuste)
Vazão Máxima Experimental	4276,813	20,499	29448	0,621455	0,642729	0,619275	0,573637	0,617029	0,644194	0,628149	0,625444
Limite Inferior de Reynolds ReD	1477,438	12,305	17677	0,634698	0,656425	0,622846	0,576477	0,619995	0,657042	0,635748	0,635748
Comparação	------	------	10000	------	------	0,628070	0,580632	0,626579	0,675840	0,665433	0,650825

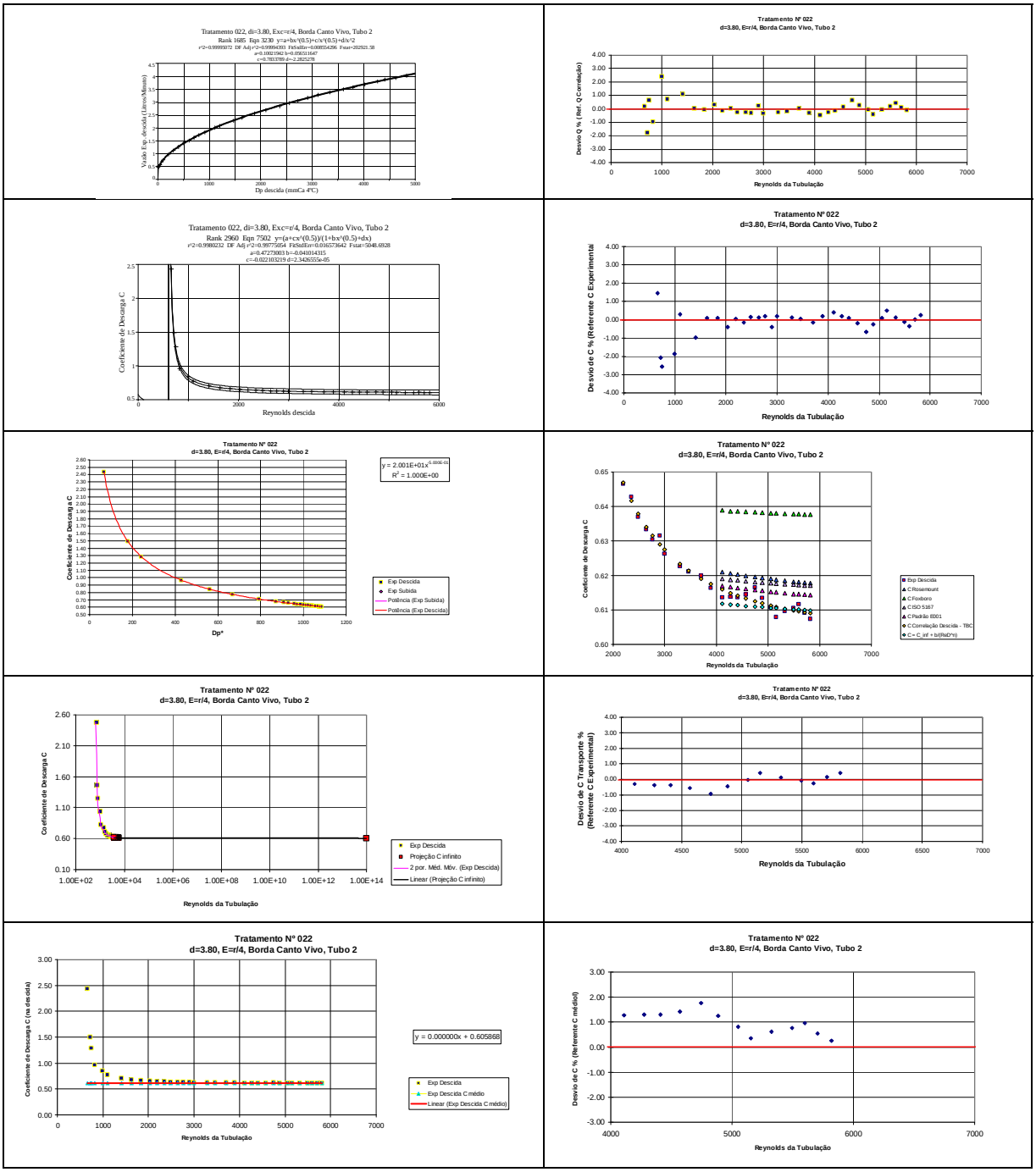


Figura D.22: Gráficos para o Tratamento E022.

Tabela D.22: Tratamento E022.

Condição	Observação			Coeficientes		Coeficientes para Orifício com Borda Canto Vivo e Concêntrica				C (Correlações)	
	Dp (mmCa)	Vazão (L/min)	Reynolds	C (Experimental)	K (Experimental)	C (Rosemount)	C (Foxboro)	C (ISO 5167)	C (Padrão)	C (Tb)	C (Ajuste)
Vazão Máxima Experimental	4834,750	4,036	5818	0,607419	0,608177	0,617710	0,637630	0,617026	0,619102	0,609010	0,609878
Limite Inferior de Reynolds	4024,188	3,695	5326	0,609561	0,610322	0,618482	0,637914	0,617478	0,619964	0,610324	0,610324
ReD Comparação	------	------	10000	------	------	0,613646	0,636135	0,618665	0,614570	0,606031	0,607534

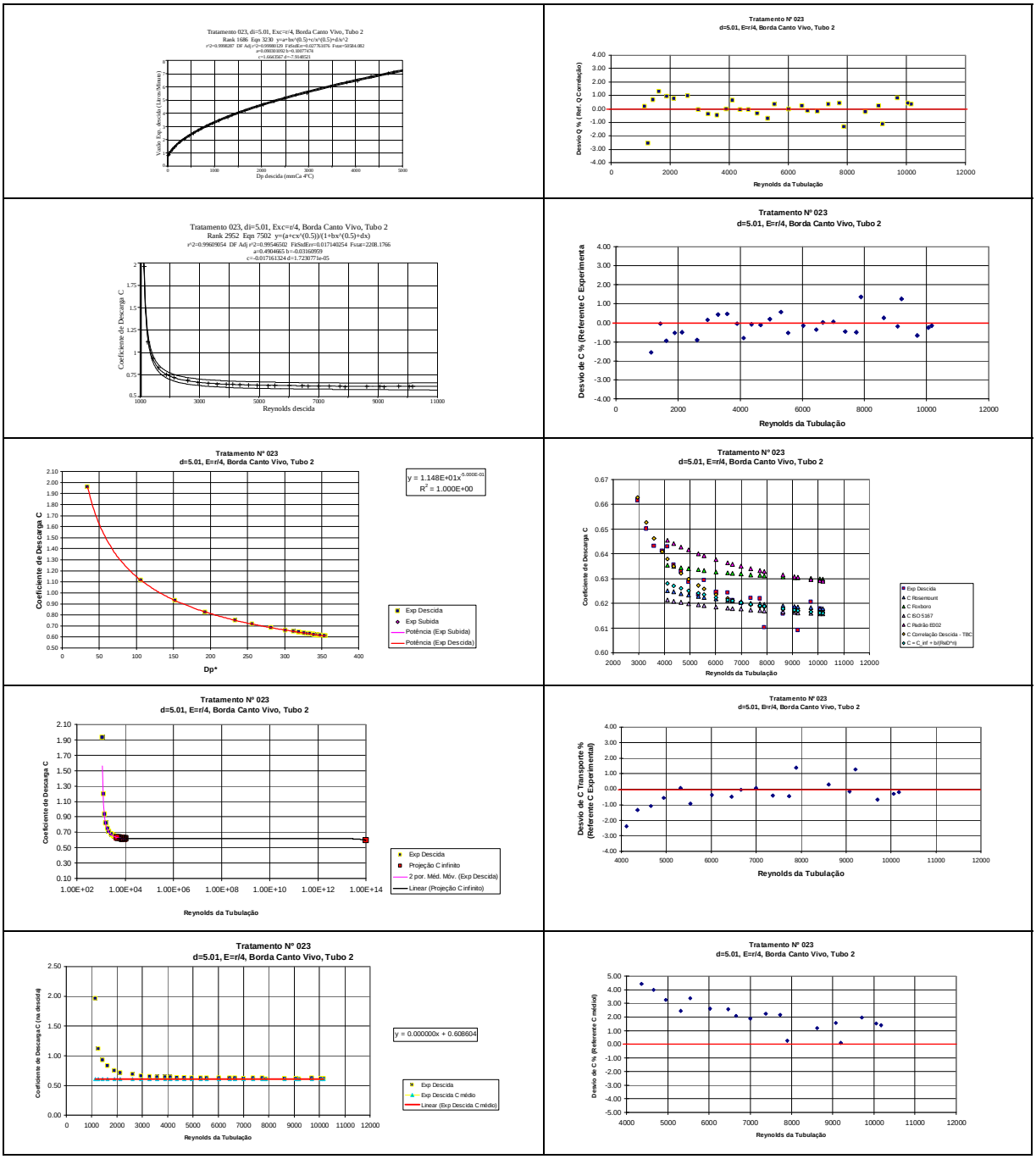


Figura D.23: Gráficos para o Tratamento E023.

Tabela D.23: Tratamento E023.

Condição	Observação			Coeficientes		Coeficientes para Orifício com Borda Canto Vivo e Concêntrica				C (Correlações)	
	Dp (mmCa)	Vazão (L/min)	Reynolds	C (Experimental)	K (Experimental)	C (Rosemount)	C (Foxboro)	C (ISO 5167)	C (Padrão)	C (Tb)	C (Ajuste)
Vazão Máxima Experimental	4815,000	7,131	10174	0,617163	0,619501	0,617897	0,629834	0,615771	0,628950	0,616250	0,615984
Limite Inferior de Reynolds	2258,188	4,906	6999	0,619941	0,622290	0,620517	0,631833	0,617648	0,634904	0,620301	0,620301
ReD Comparação	------	------	10000	------	------	0,618007	0,629918	0,619200	0,629200	0,616330	0,616166

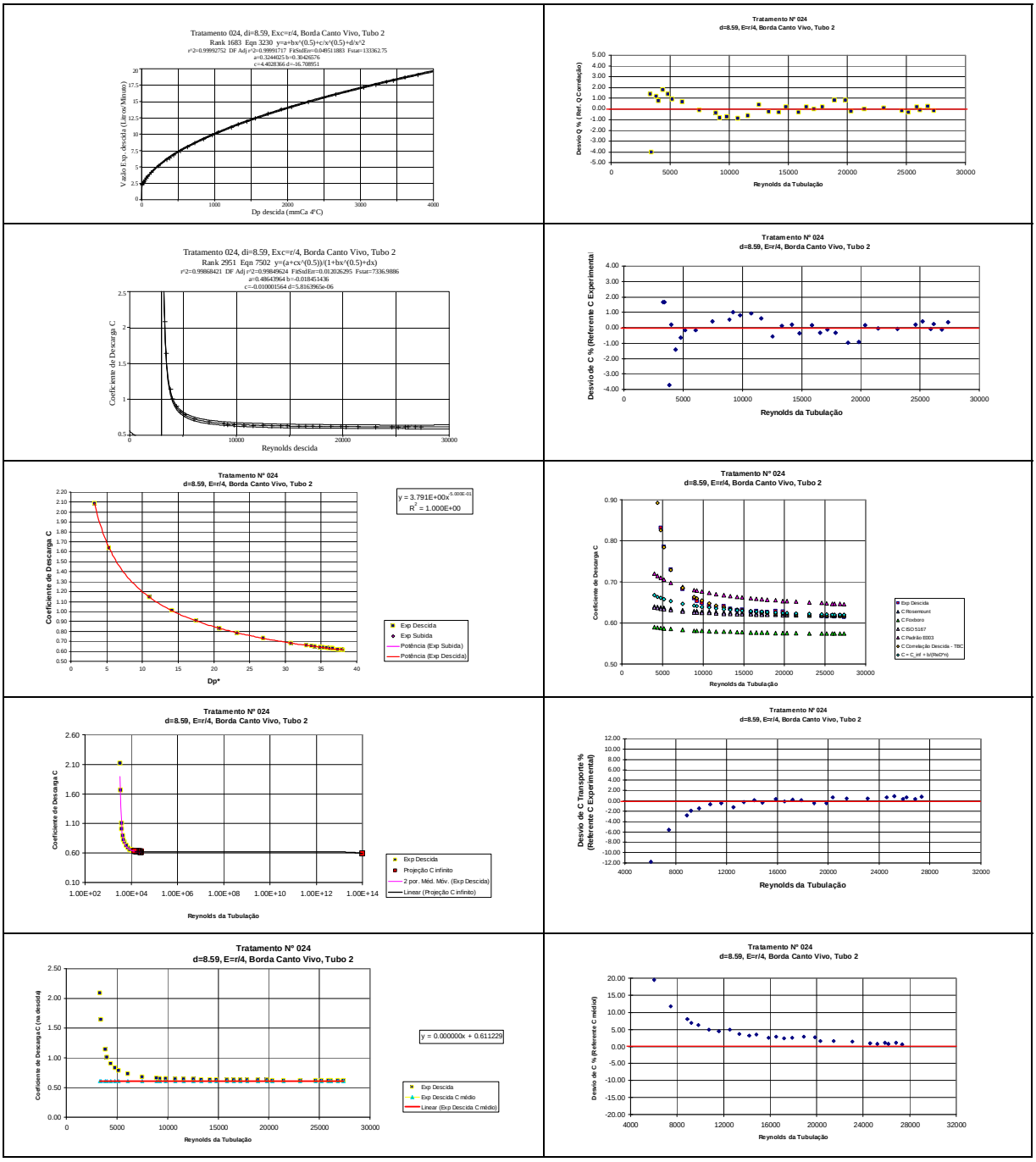


Figura D.24: Gráficos para o Tratamento E024.

Tabela D.24: Tratamento E024.

Condição	Observação			Coeficientes		Coeficientes para Orifício com Borda Canto Vivo e Concêntrica				C (Correlações)	
	Dp (mmCa)	Vazão (L/min)	Reynolds	C (Experimental)	K (Experimental)	C (Rosemount)	C (Foxboro)	C (ISO 5167)	C (Padrão)	C (Tb)	C (Ajuste)
Vazão Máxima Experimental	3789,875	19,088	27348	0,614745	0,635789	0,619738	0,574003	0,617400	0,645860	0,616999	0,619639
Limite Inferior de Reynolds	1051,500	10,344	14820	0,632458	0,654109	0,624307	0,577637	0,621279	0,662298	0,630262	0,630262
ReD Comparação	------	------	10000	------	------	0,628070	0,580631	0,626579	0,675840	0,652769	0,639014

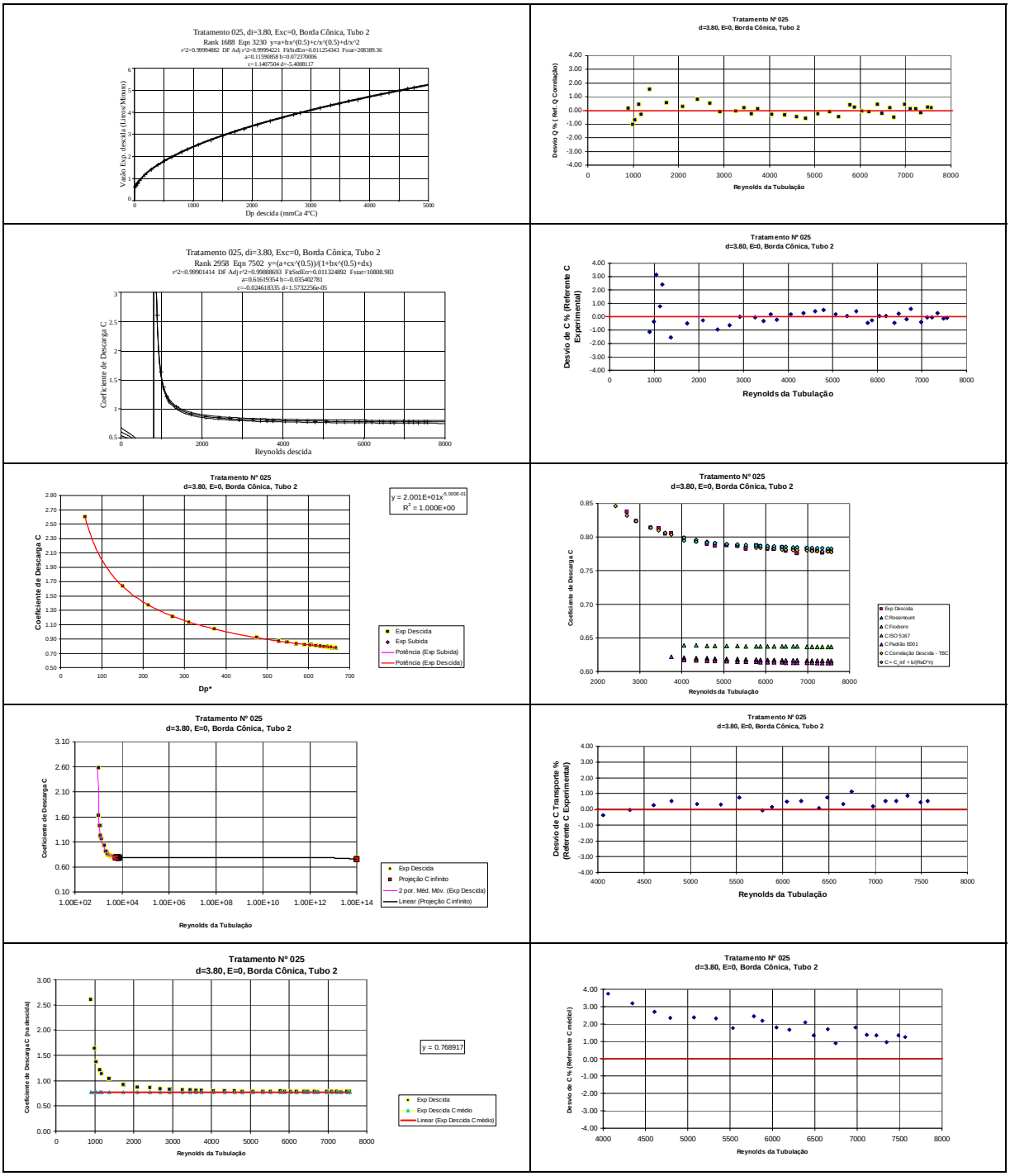


Figura D.25: Gráficos para o Tratamento E025.

Tabela D.25: Tratamento E025.

Condição	Observação			Coeficientes		Coeficientes para Orifício com Borda Canto Vivo e Concêntrica				C (Correlações)	
	Dp (mmCa)	Vazão (L/min)	Reynolds	C (Experimental)	K (Experimental)	C (Rosemount)	C (Foxboro)	C (ISO 5167)	C (Padrão)	C (Tb)	C (Ajuste)
Vazão Máxima Experimental	4758,438	5,134	7569	0,778624	0,779597	0,615597	0,636854	0,615833	0,616747	0,777985	0,782667
Limite Inferior de Reynolds ReD	1869,250	3,252	4795	0,787006	0,787988	0,619447	0,638270	0,618053	0,621041	0,791043	0,791043
Comparação	------	------	10000	------	------	0,613645	0,636136	0,618665	0,614570	0,774517	0,778421

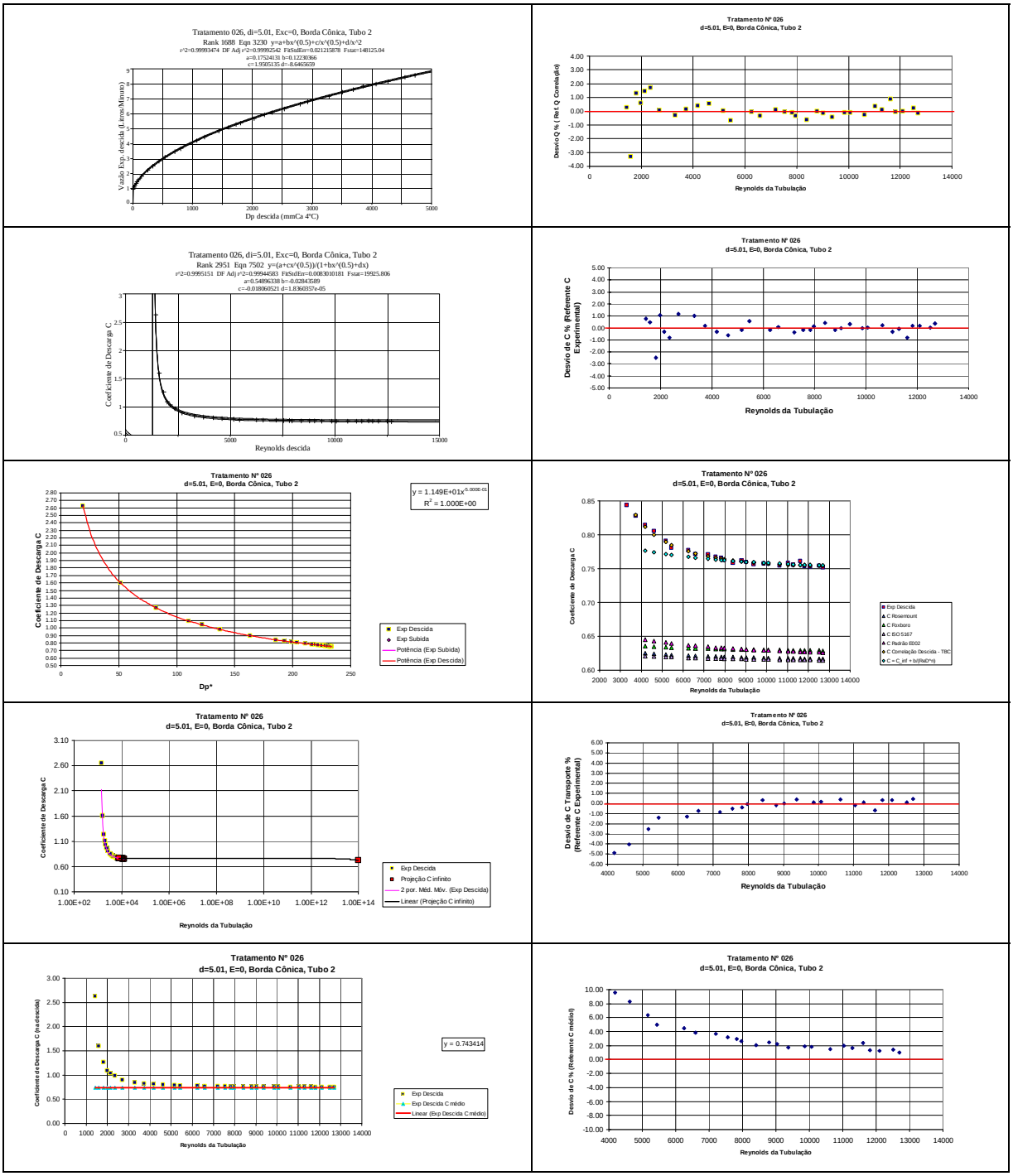


Figura D.26: Gráficos para o Tratamento E026.

Tabela D.26: Tratamento E026.

Condição	Observação			Coeficientes		Coeficientes para Orifício com Borda Canto Vivo e Concêntrica				C (Correlações)	
	Dp (mmCa)	Vazão (L/min)	Reynolds	C (Experimental)	K (Experimental)	C (Rosemount)	C (Foxboro)	C (ISO 5167)	C (Padrão)	C (Tb)	C (Ajuste)
Vazão Máxima Experimental	4729,250	8,603	12696	0,751079	0,753923	0,616560	0,628818	0,614868	0,625915	0,753967	0,754552
Limite Inferior de Reynolds	2206,750	5,961	8797	0,761827	0,764712	0,618856	0,630569	0,616443	0,631133	0,760502	0,760502
ReD Comparação	------	------	10000	------	------	0,618006	0,629921	0,619199	0,629200	0,757289	0,758298

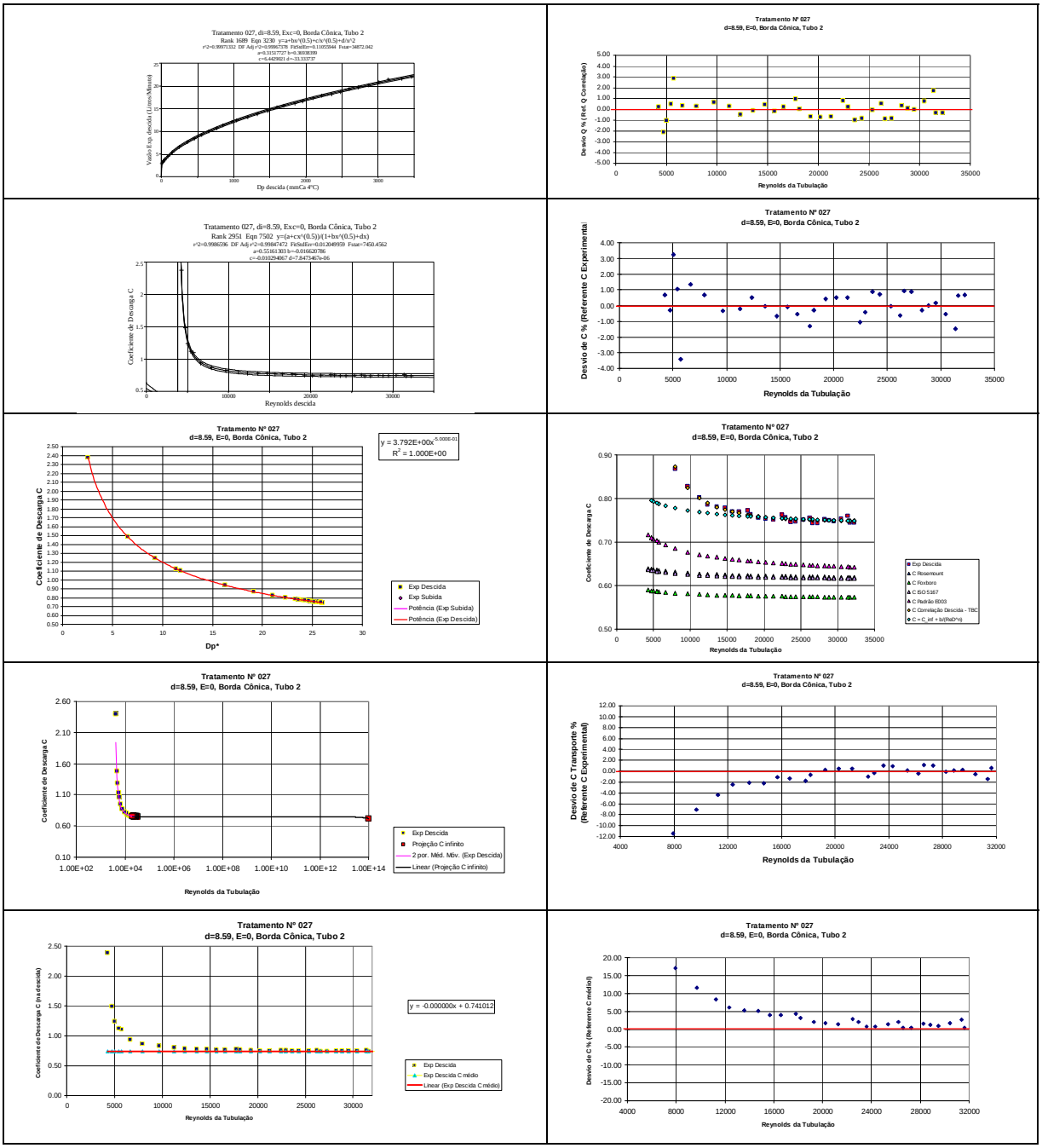


Figura D.27: Gráficos para o Tratamento E027.

Tabela D.27: Tratamento E027.

Condição	Observação			Coeficientes		Coeficientes para Orifício com Borda Canto Vivo e Concêntrica				C (Correlações)	
	Dp (mmCa)	Vazão (L/min)	Reynolds	C (Experimental)	K (Experimental)	C (Rosemount)	C (Foxboro)	C (ISO 5167)	C (Padrão)	C (Tb)	C (Ajuste)
Vazão Máxima Experimental	3466,563	22,097	32250	0,743992	0,769457	0,618728	0,573211	0,616596	0,642231	0,748976	0,748797
Limite Inferior de Reynolds ReD	1478,438	14,582	21282	0,751782	0,777513	0,621440	0,575368	0,618799	0,651987	0,755449	0,755449
Comparação	------	------	10000	------	------	0,628068	0,580642	0,626578	0,675840	0,818693	0,771714

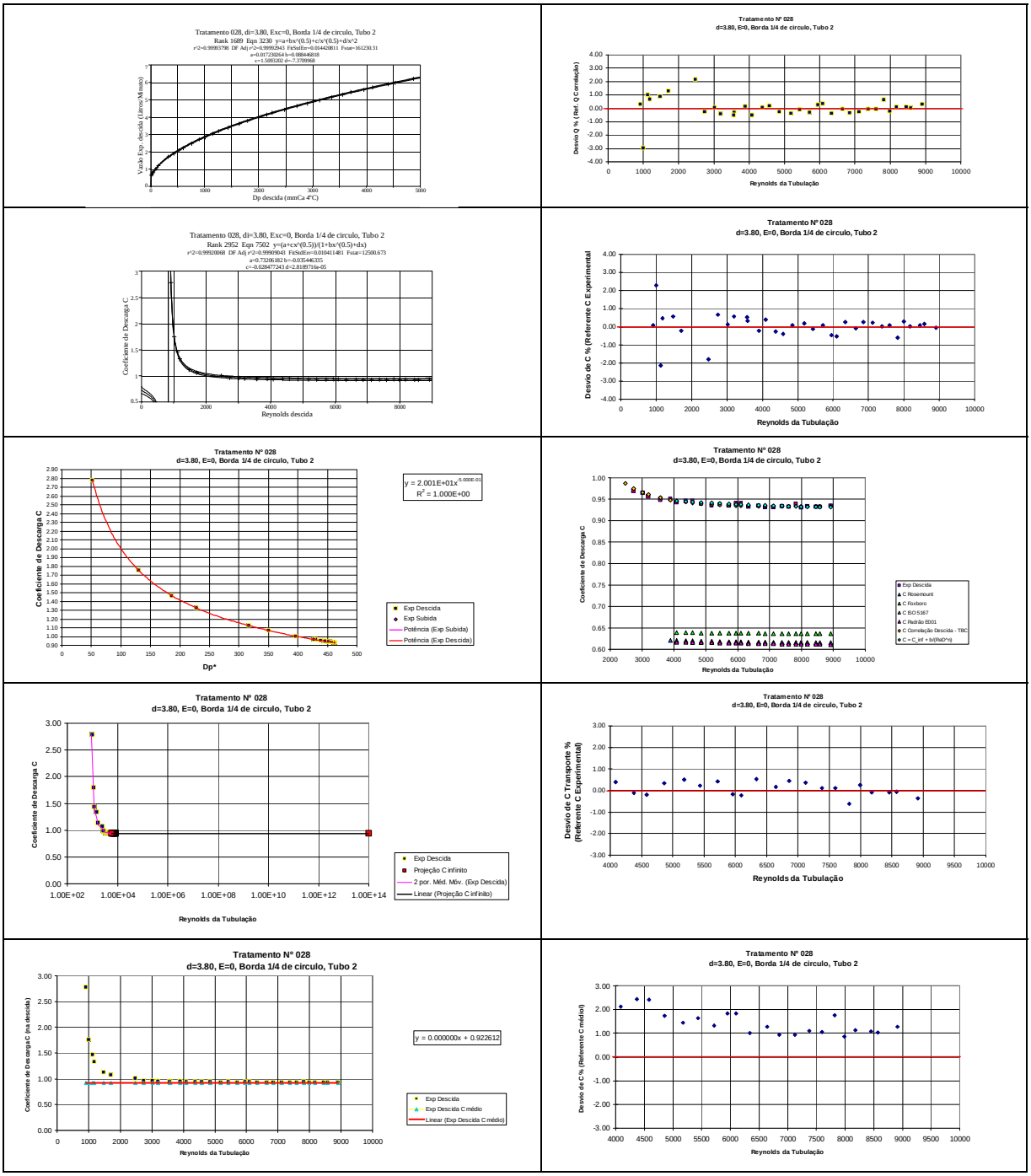


Figura D.28: Gráficos para o Tratamento E028.

Tabela D.28: Tratamento E028.

Condição	Observação			Coeficientes		Coeficientes para Orifício com Borda Canto Vivo e Concêntrica				C (Correlações)	
	Dp (mmCa)	Vazão (L/min)	Reynolds	C (Experimental)	K (Experimental)	C (Rosemount)	C (Foxboro)	C (ISO 5167)	C (Padrão)	C (Tb)	C (Ajuste)
Vazão Máxima Experimental	4880,188	6,237	8915	0,934329	0,935496	0,614418	0,636419	0,615195	0,615431	0,933779	0,931005
Limite Inferior de Reynolds	1008,875	2,859	4087	0,942128	0,943304	0,621016	0,638846	0,619013	0,622789	0,945790	0,945790
ReD Comparação	------	------	10000	------	------	0,613646	0,636135	0,618665	0,614570	0,935001	0,929275

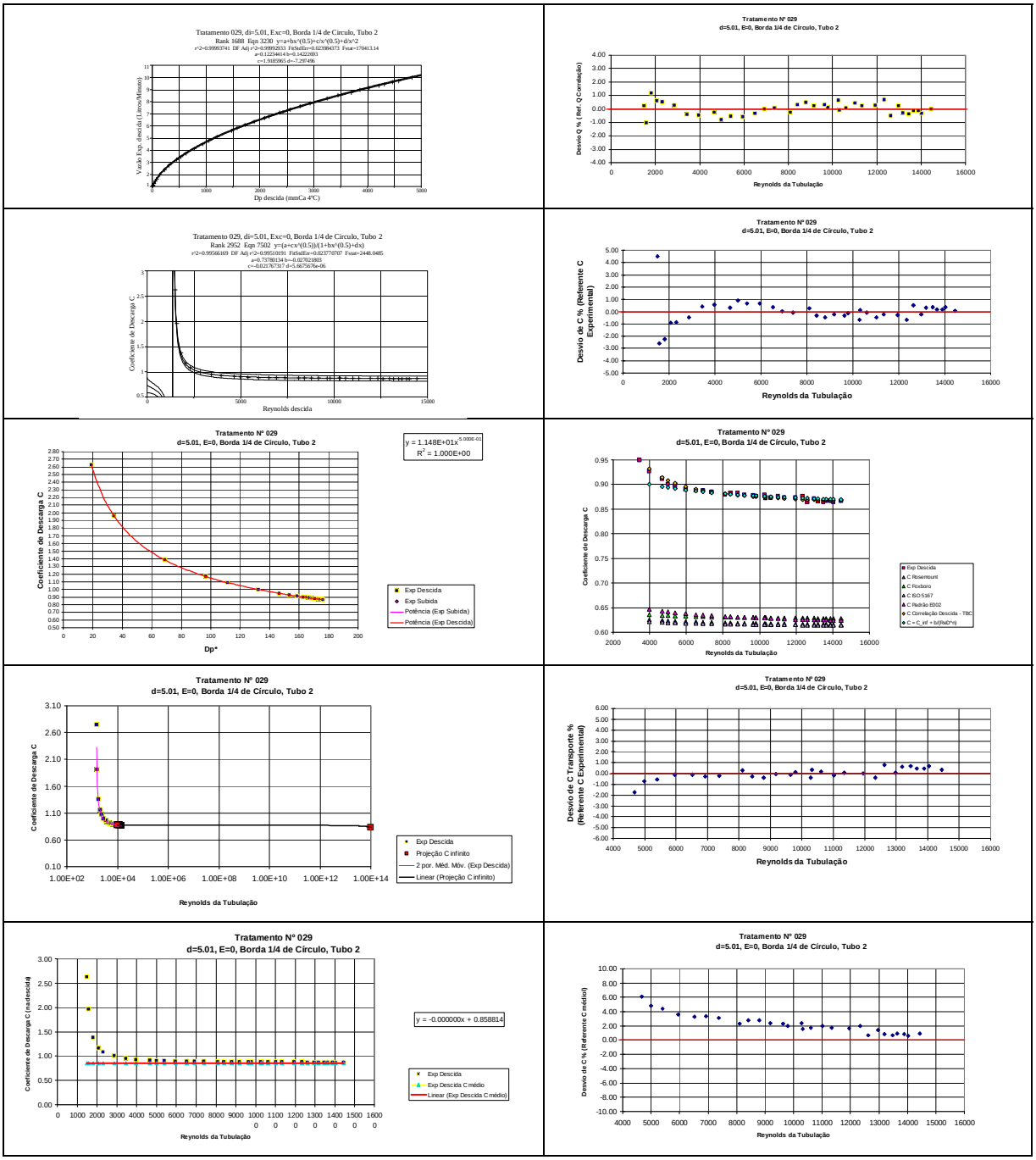


Figura D.29: Gráficos para o Tratamento E029.

Tabela D.29: Tratamento E029.

Condição	Observação			Coeficientes		Coeficientes para Orifício com Borda Canto Vivo e Concêntrica				C (Correlações)	
	Dp (mmCa)	Vazão (L/min)	Reynolds	C (Experimental)	K (Experimental)	C (Rosemount)	C (Foxboro)	C (ISO 5167)	C (Padrão)	C (Tb)	C (Ajuste)
Vazão Máxima Experimental	4829,063	10,031	14443	0,866783	0,870066	0,615849	0,628273	0,614403	0,624297	0,867277	0,869510
Limite Inferior de Reynolds	1482,313	5,634	8112	0,878679	0,882007	0,619424	0,631000	0,616848	0,632420	0,881048	0,881048
ReD Comparação	------	------	10000	------	------	0,618007	0,629919	0,619200	0,629200	0,874462	0,876474

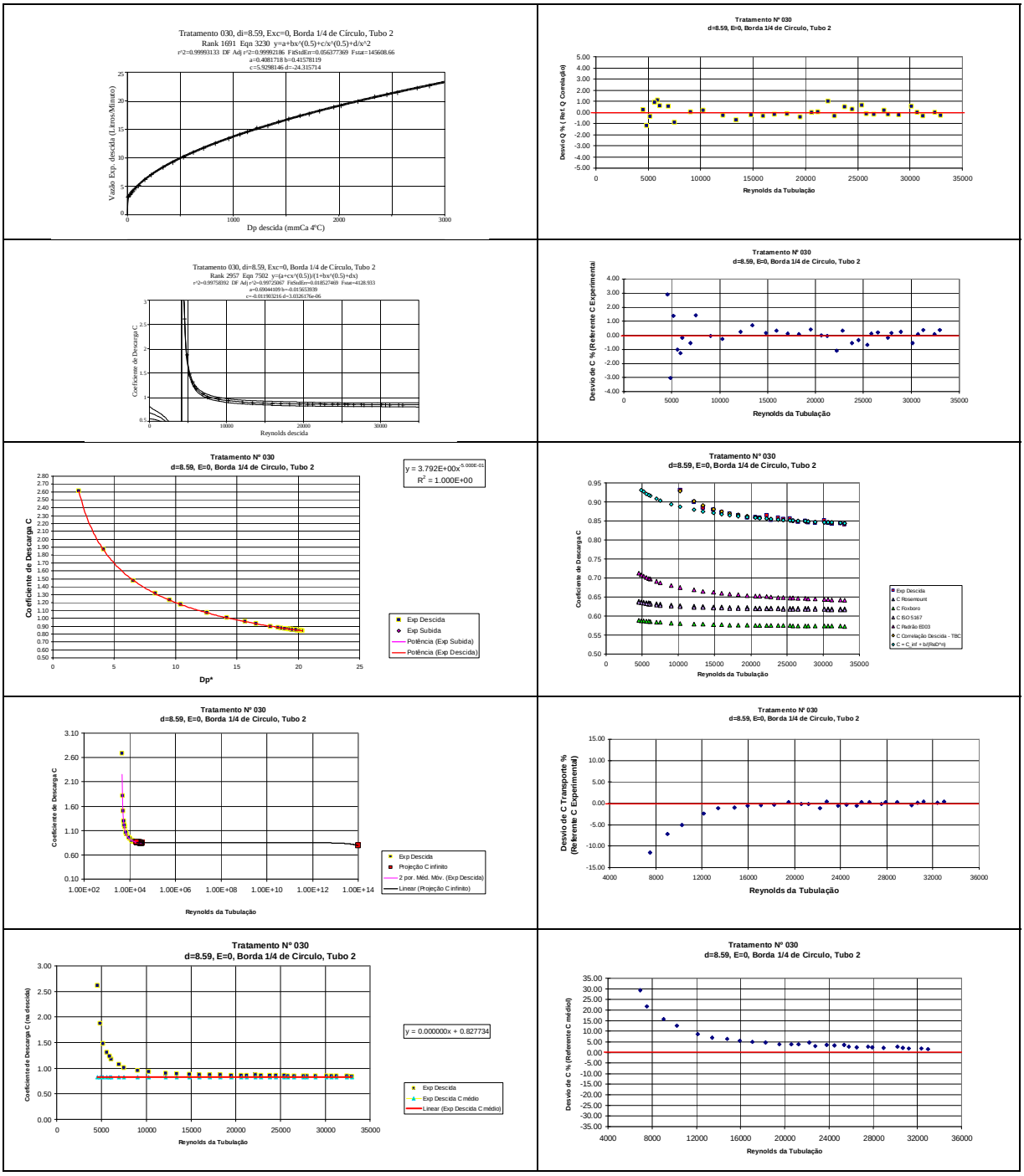


Figura D.30: Gráficos para o Tratamento E030.

Tabela D.30: Tratamento E030.

Condição	Observação			Coeficientes		Coeficientes para Orifício com Borda Canto Vivo e Concêntrica				C (Correlações)	
	Dp (mmCa)	Vazão (L/min)	Reynolds	C (Experimental)	K (Experimental)	C (Rosemount)	C (Foxboro)	C (ISO 5167)	C (Padrão)	C (Tb)	C (Ajuste)
Vazão Máxima Experimental	2857,250	22,674	32954	0,840907	0,869690	0,618603	0,573109	0,616497	0,641778	0,844191	0,844303
Limite Inferior de Reynolds	1224,813	15,279	22206	0,865469	0,895092	0,621136	0,575124	0,618545	0,650893	0,856152	0,856152
ReD Comparação	------	------	10000	------	------	0,628069	0,580639	0,626578	0,675840	0,934238	0,888578

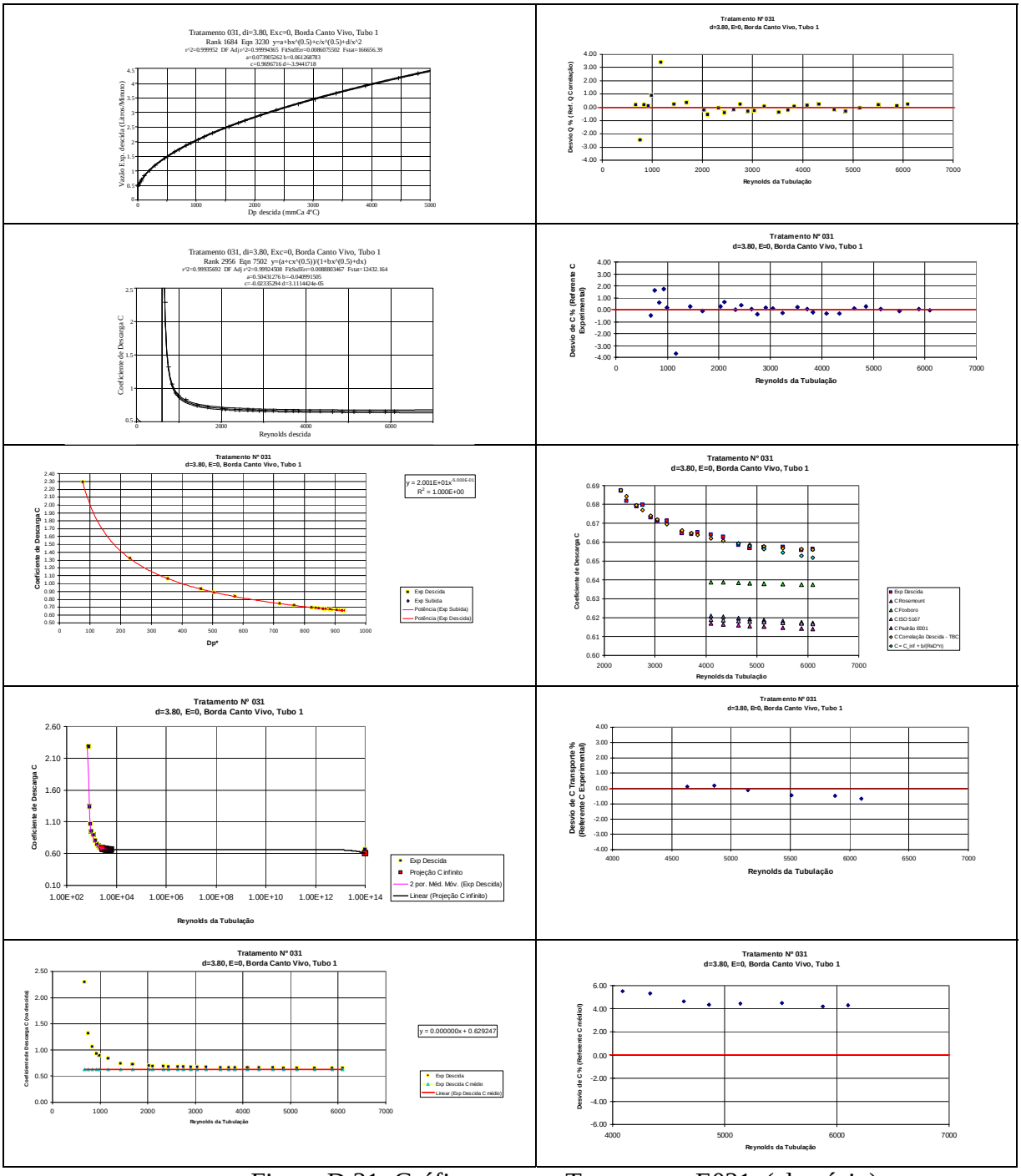


Figura D.31: Gráficos para o Tratamento E031, (alumínio).

Tabela D.31: Tratamento E031.

Condição	Observação			Coeficientes		Coeficientes para Orifício com Borda Canto Vivo e Concêntrica				C (Correlações)	
	Dp (mmCa)	Vazão (L/min)	Reynolds	C (Experimental)	K (Experimental)	C (Rosemount)	C (Foxboro)	C (ISO 5167)	C (Padrão)	C (Tb)	C (Ajuste)
Vazão Máxima Experimental	4794,813	4,341	6098	0,656163	0,656983	0,617312	0,637483	0,616797	0,618658	0,655957	0,651711
Limite Inferior de Reynolds	2749,688	3,299	4634	0,658494	0,659317	0,619774	0,638388	0,618250	0,621403	0,659318	0,659318
ReD Comparação	------	------	10000	------	------	0,613646	0,636134	0,618665	0,614570	0,656735	0,640380

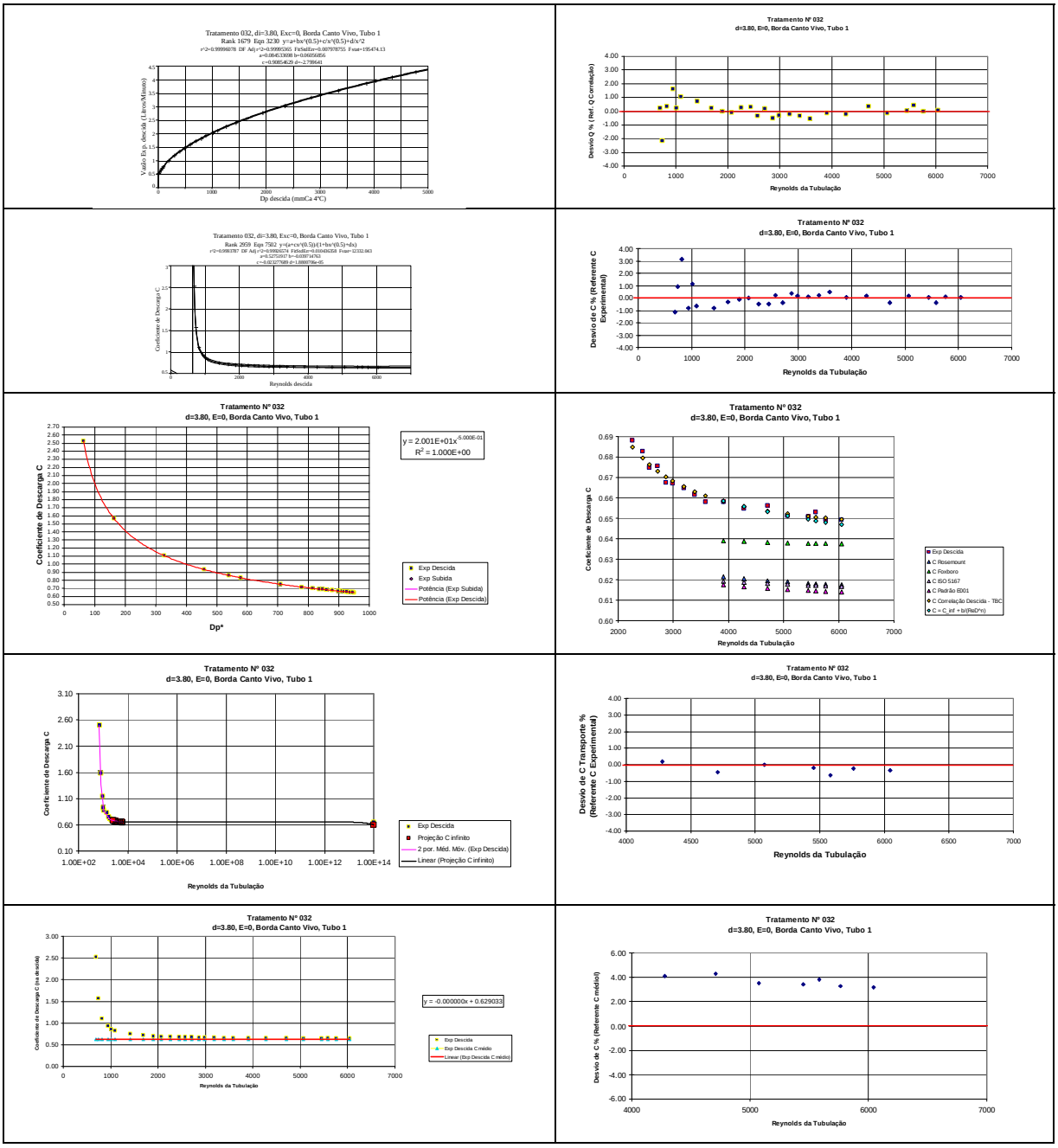


Figura D.32: Gráficos para o Tratamento E032, (inox).

Tabela D.32: Tratamento E032.

Condição	Observação			Coeficientes		Coeficientes para Orifício com Borda Canto Vivo e Concêntrica				C (Correlações)	
	Dp (mmCa)	Vazão (L/min)	Reynolds	C (Experimental)	K (Experimental)	C (Rosemount)	C (Foxboro)	C (ISO 5167)	C (Padrão)	C (Tb)	C (Ajuste)
Vazão Máxima Experimental	4788,875	4,292	6047	0,649167	0,649978	0,617382	0,637508	0,616837	0,618736	0,649545	0,646954
Limite Inferior de Reynolds	1639,625	2,545	3586	0,657883	0,658704	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,660974	0,000000
ReD Comparação	------	------	10000	------	------	0,613646	0,636134	0,618665	0,614570	0,646765	0,636513

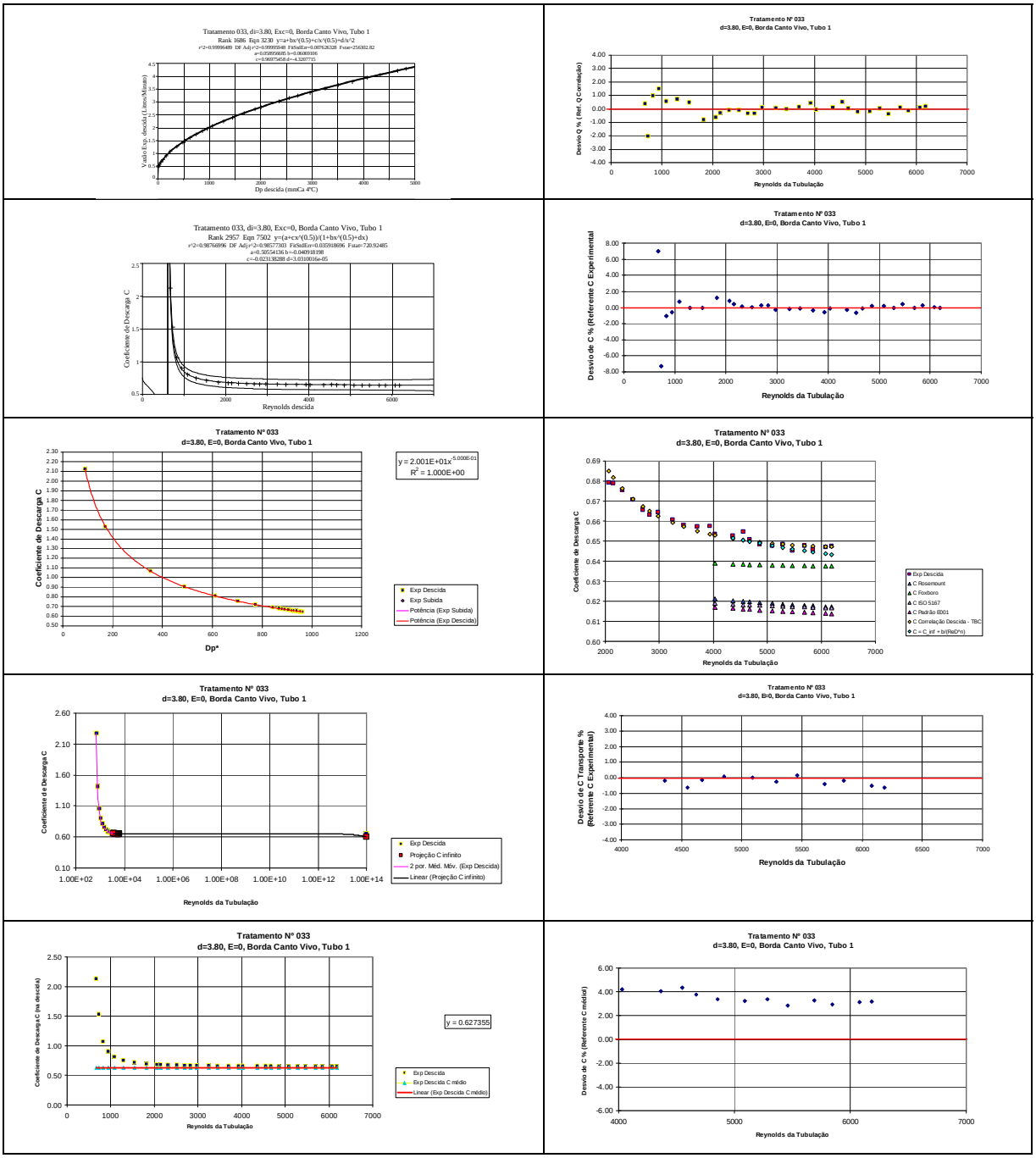


Figura D.33: Gráficos para o Tratamento E033, (inox jateado).

Tabela D.33: Tratamento E033.

Condição	Observação			Coeficientes		Coeficientes para Orifício com Borda Canto Vivo e Concêntrica				C (Correlações)	
	Dp (mmCa)	Vazão (L/min)	Reynolds	C (Experimental)	K (Experimental)	C (Rosemount)	C (Foxboro)	C (ISO 5167)	C (Padrão)	C (Tb)	C (Ajuste)
Vazão Máxima Experimental	4828,750	4,299	6187	0,647375	0,648184	0,617190	0,637439	0,616727	0,613806	0,647199	0,644730
Limite Inferior de Reynolds	2554,375	3,162	4551	0,654710	0,655527	0,619947	0,638453	0,618355	0,616098	0,650495	0,650495
ReD Comparação	------	------	10000	------	------	0,613646	0,636135	0,618665	0,610860	0,648429	0,637318

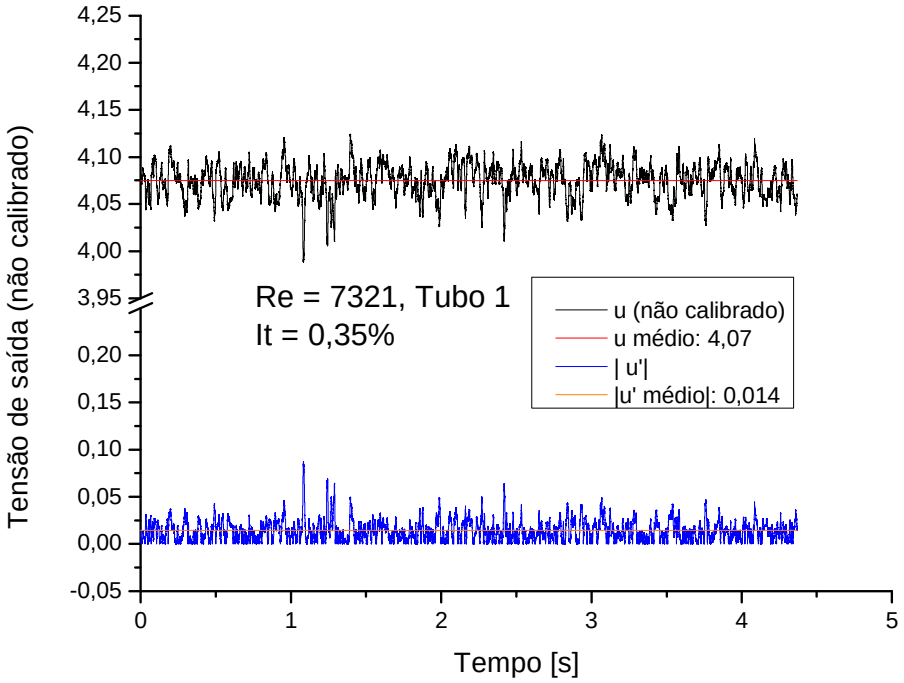


Figura D.34: Gráfico de tensão de saída *versus* tempo para o Tratamento IT001.

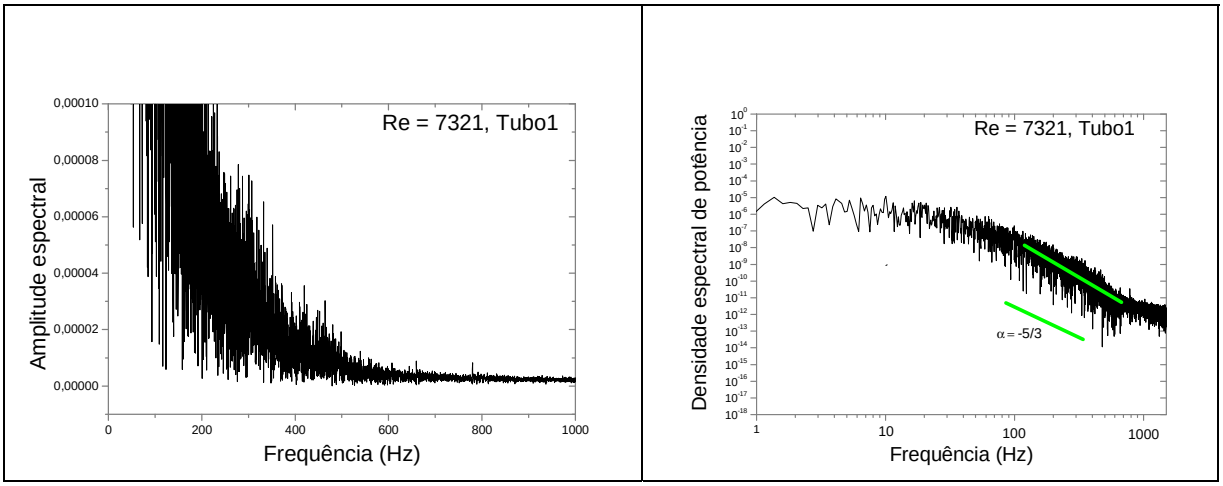


Figura D.35: Gráficos de frequência para o Tratamento IT001.

A medida IT002 foi obtida com frequência de amostragem diferente das demais, portanto não utilizado.

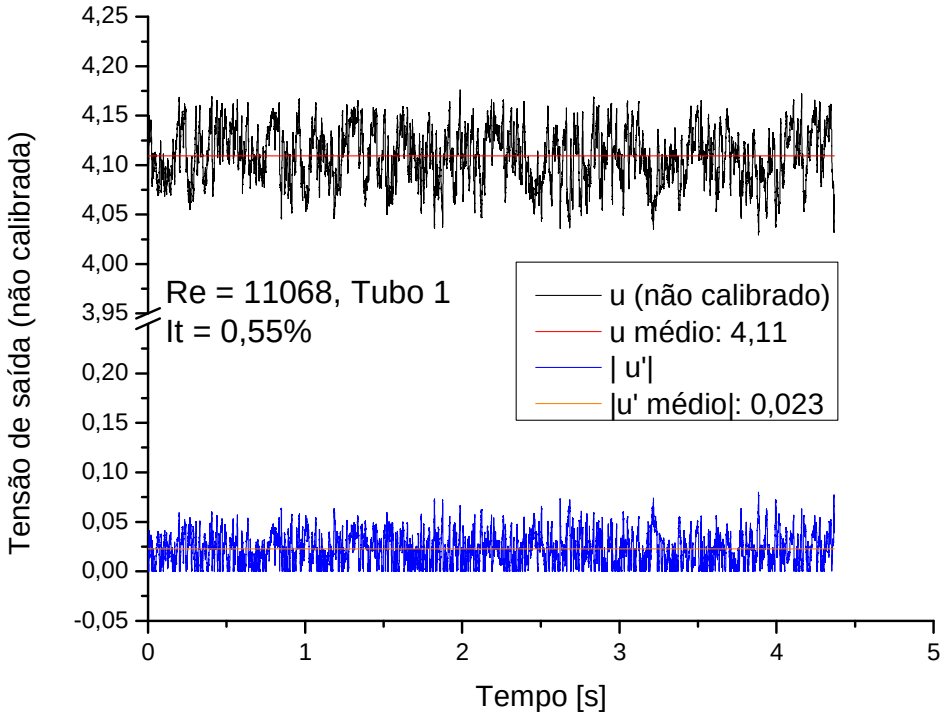


Figura D.36: Gráfico de tensão de saída *versus* tempo para o Tratamento IT002.

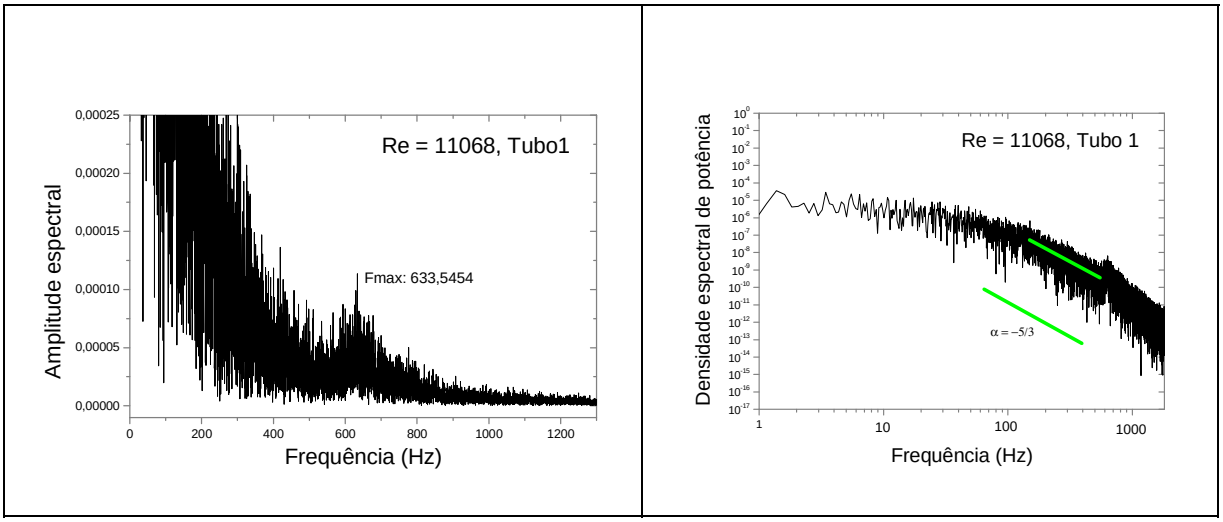


Figura D.37: Gráficos de frequência para o Tratamento IT002.

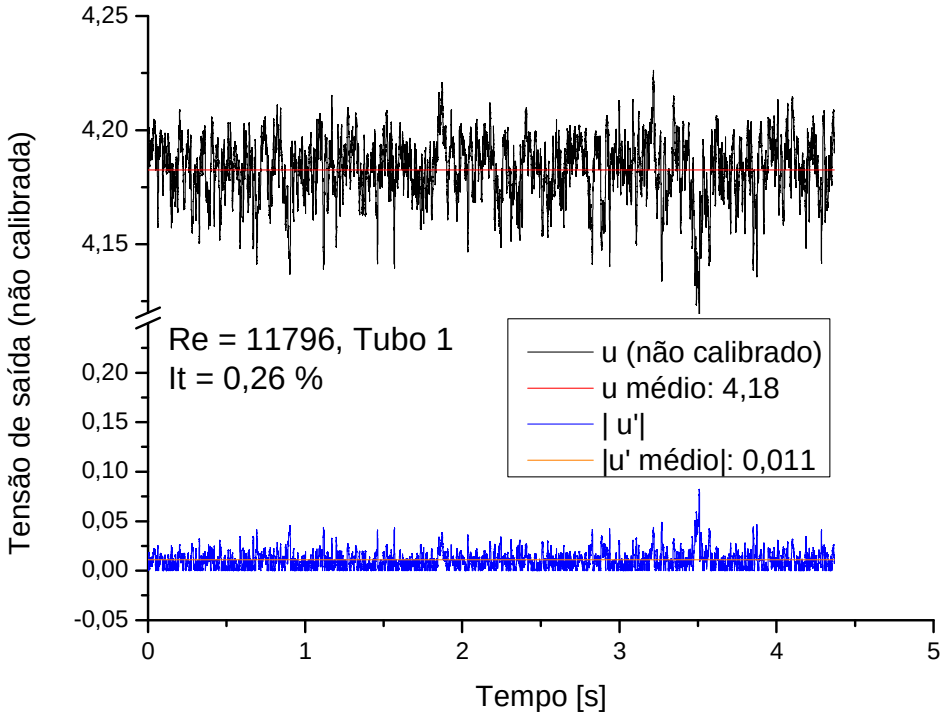


Figura D.38: Gráfico de tensão de saída *versus* tempo para o Tratamento IT003.

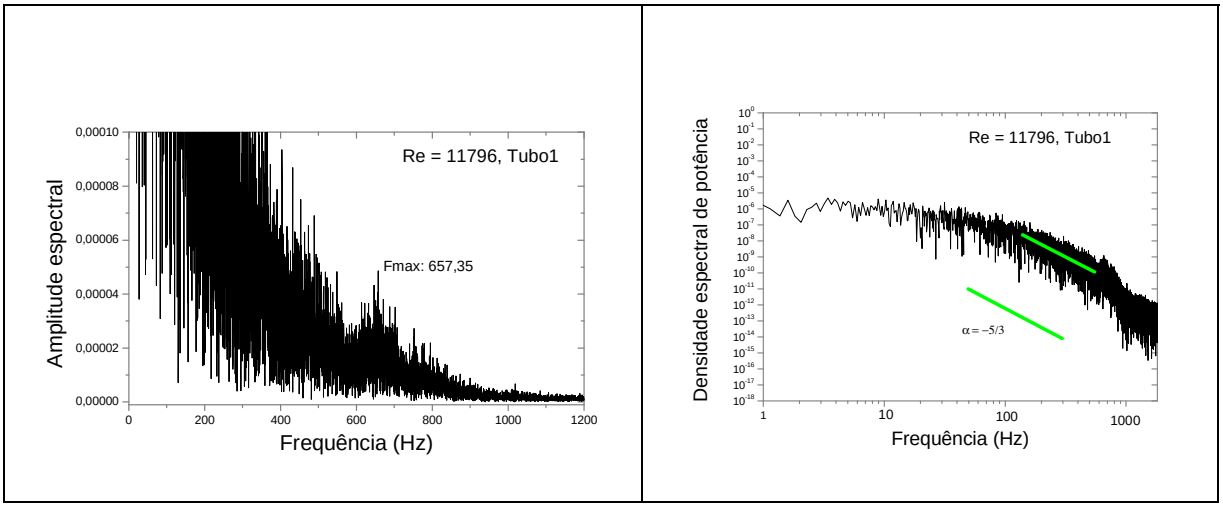


Figura D.39: Gráficos de frequência para o Tratamento IT003.

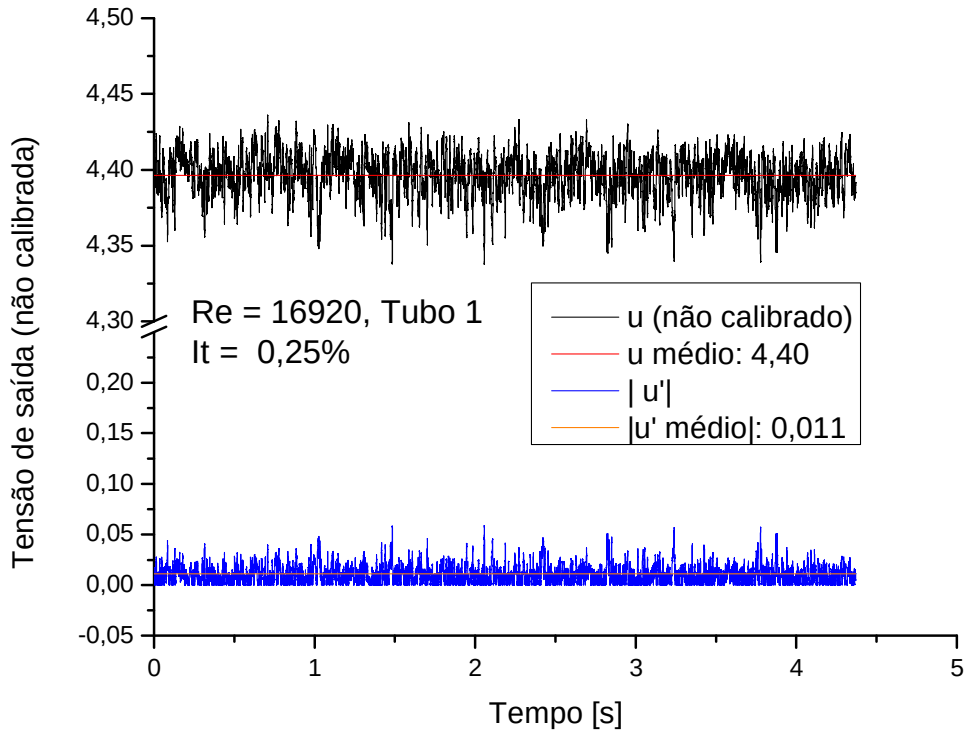


Figura D.40: Gráfico de tensão de saída *versus* tempo para o Tratamento IT004.

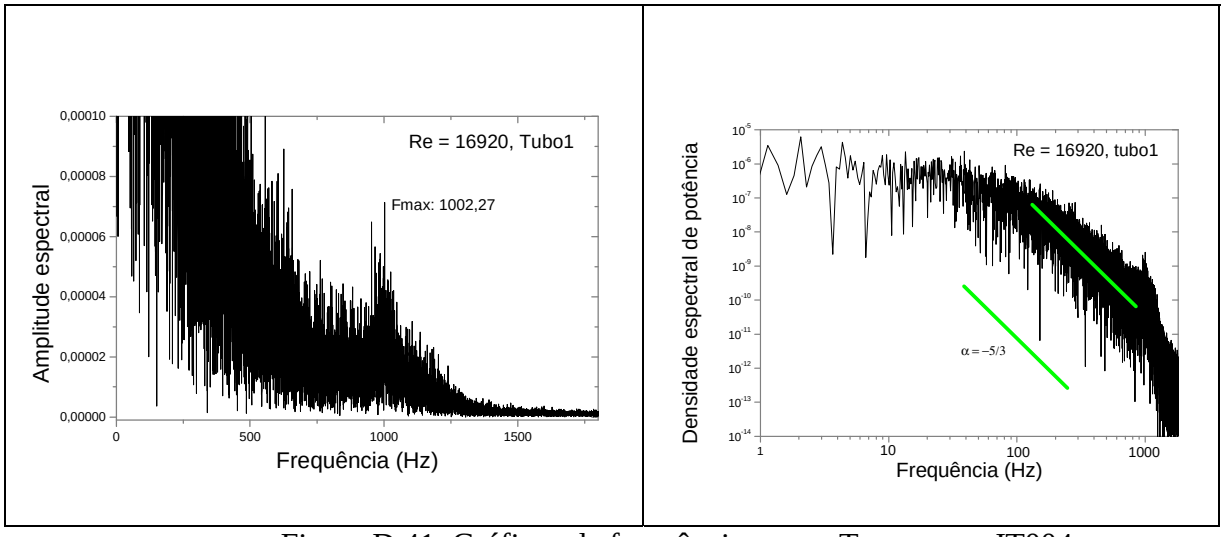


Figura D.41: Gráficos de frequência para o Tratamento IT004.

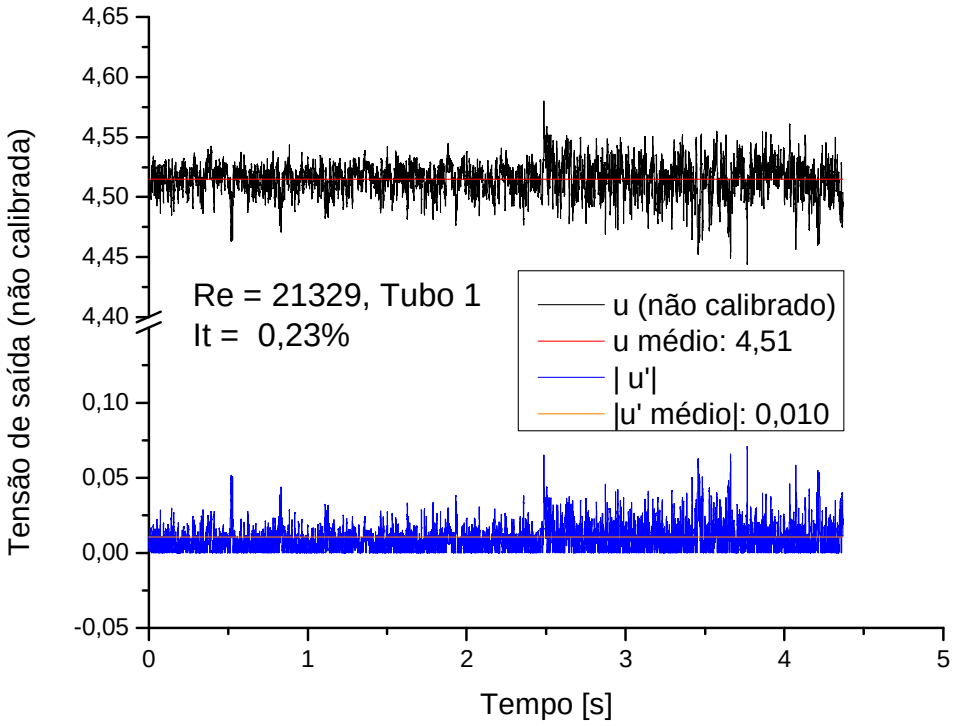


Figura D.42: Gráfico de tensão de saída *versus* tempo para o Tratamento IT005.

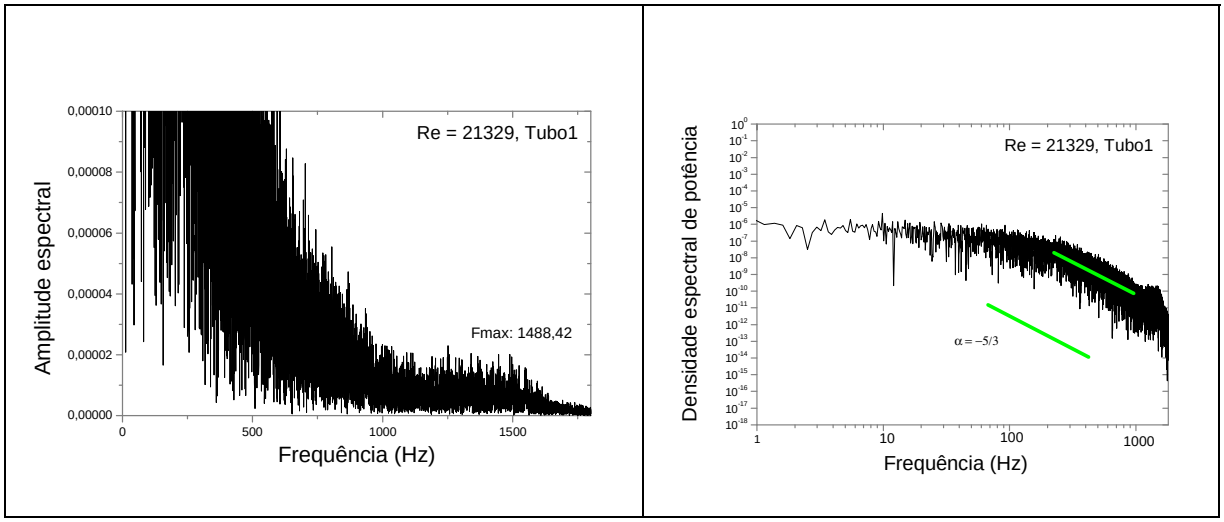


Figura D.43: Gráficos de frequência para o Tratamento IT005.

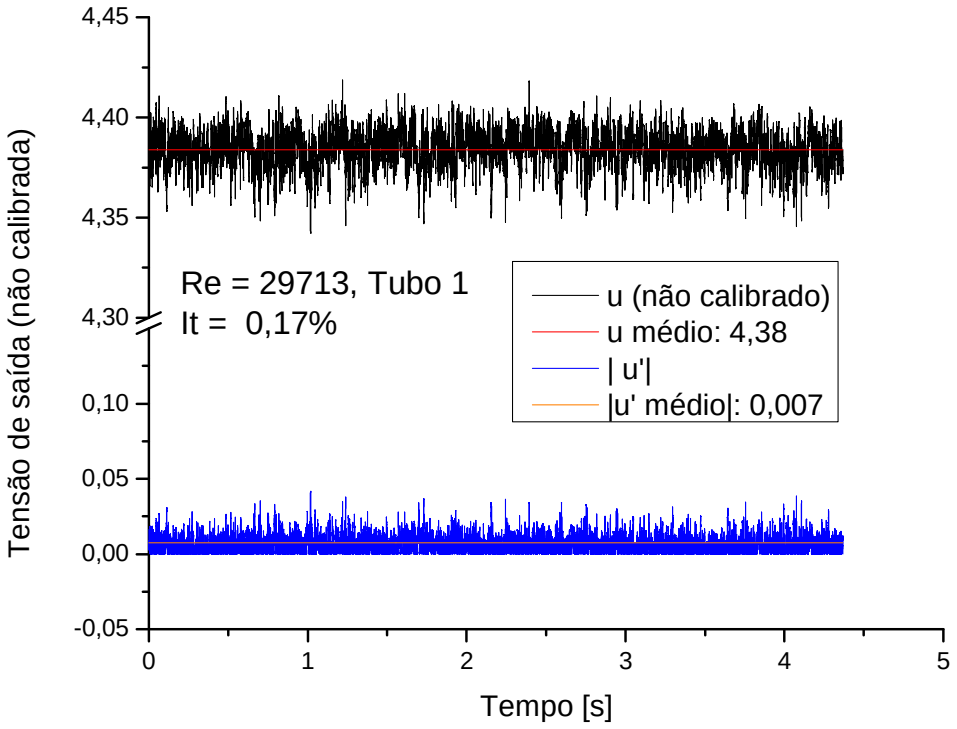


Figura D.44: Gráfico de tensão de saída *versus* tempo para o Tratamento IT006.

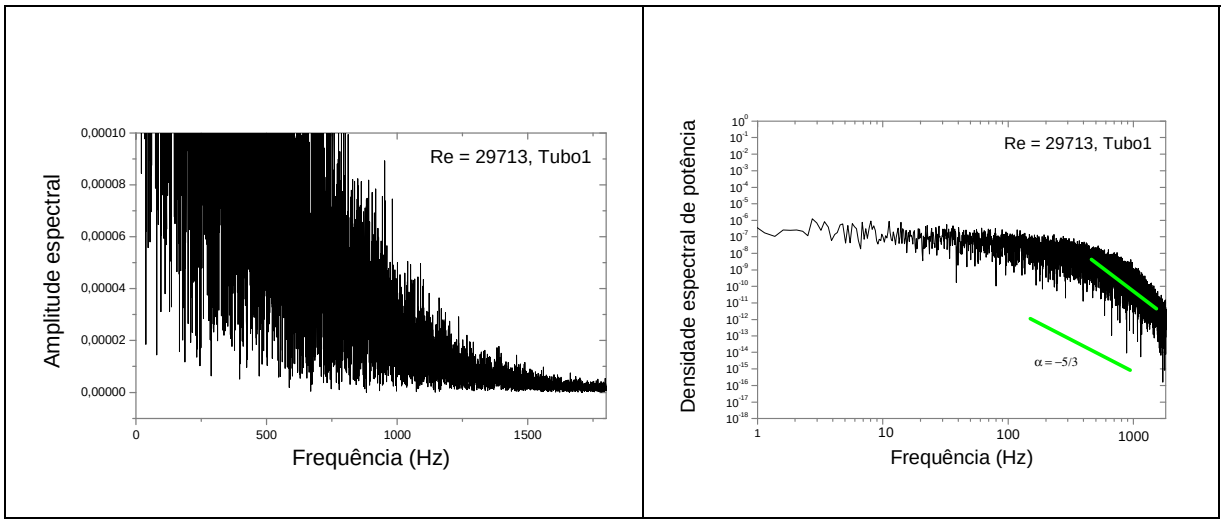


Figura D.45: Gráficos de frequência para o Tratamento IT006.

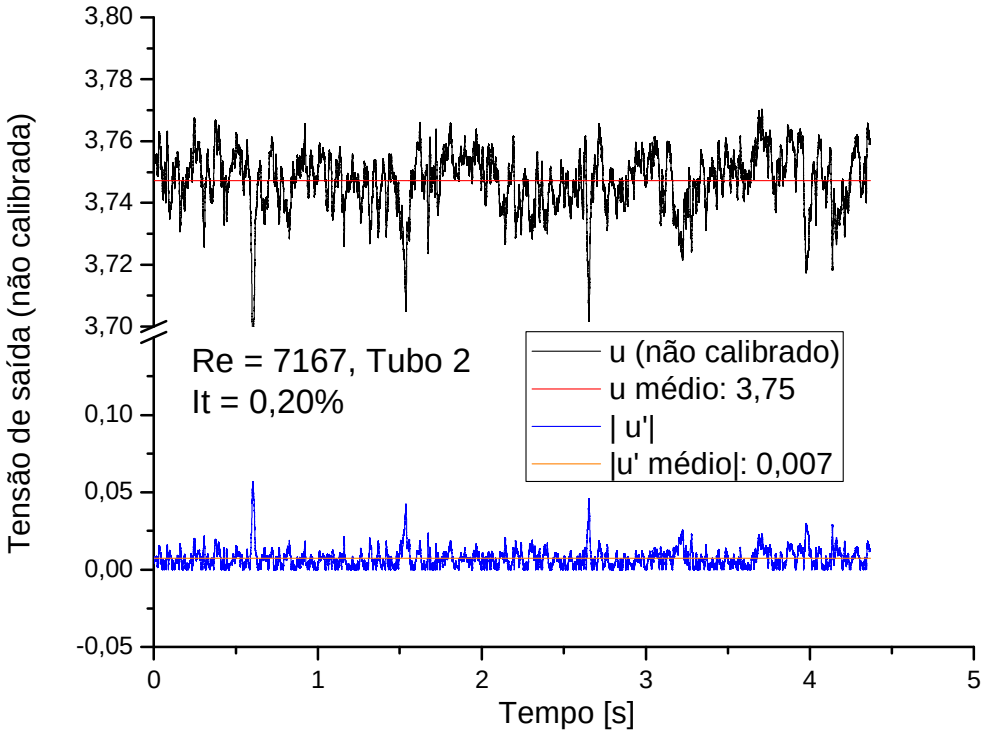


Figura D.46: Gráfico de tensão de saída *versus* tempo para o Tratamento IT007.

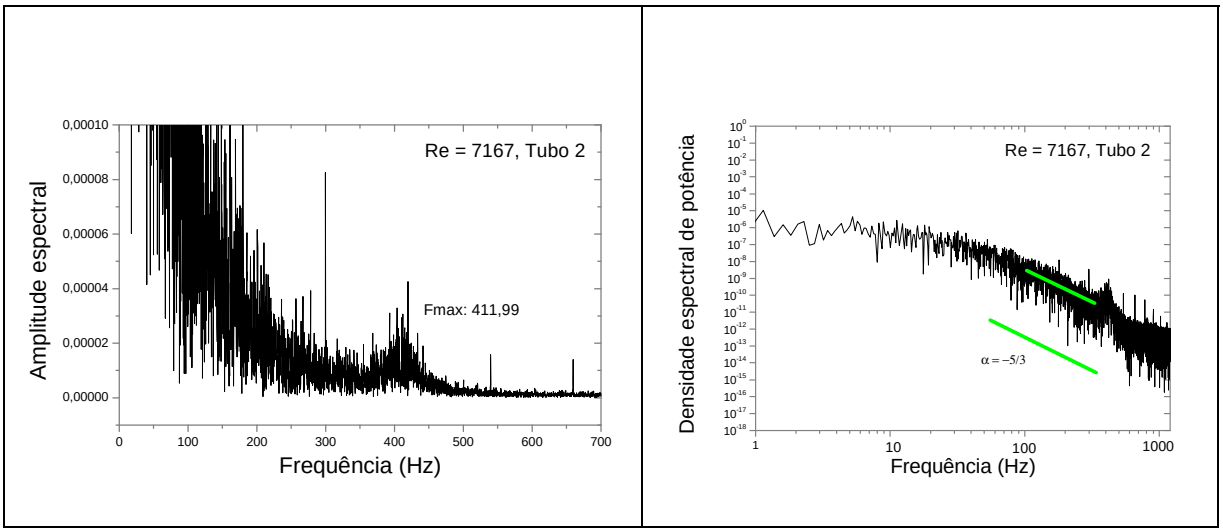


Figura D.47: Gráficos de frequência para o Tratamento IT007.

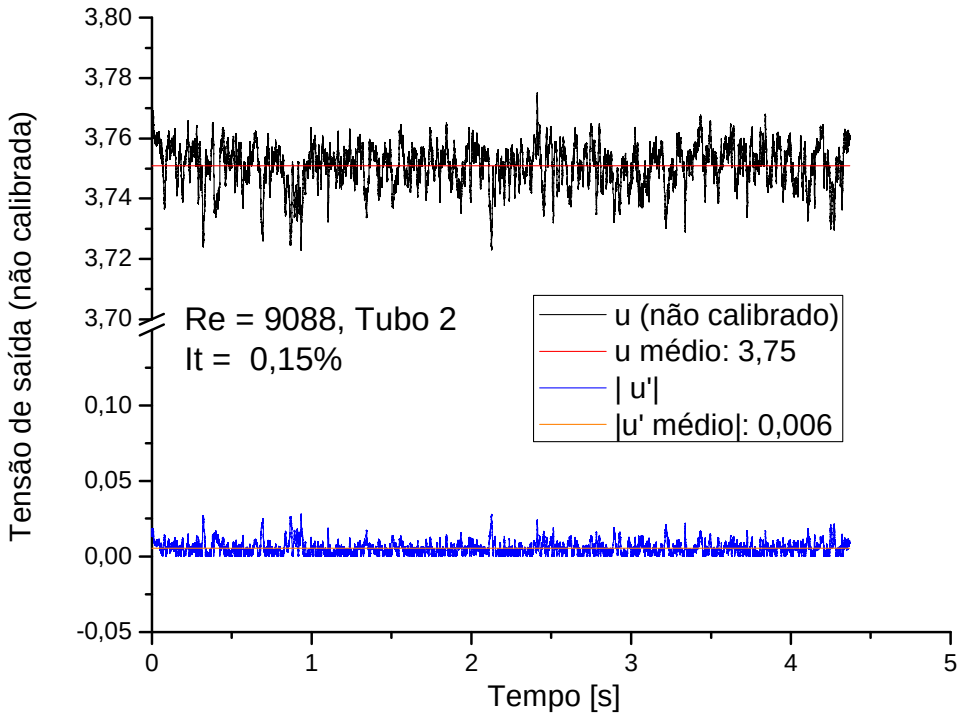


Figura D.48: Gráfico de tensão de saída *versus* tempo para o Tratamento IT008.

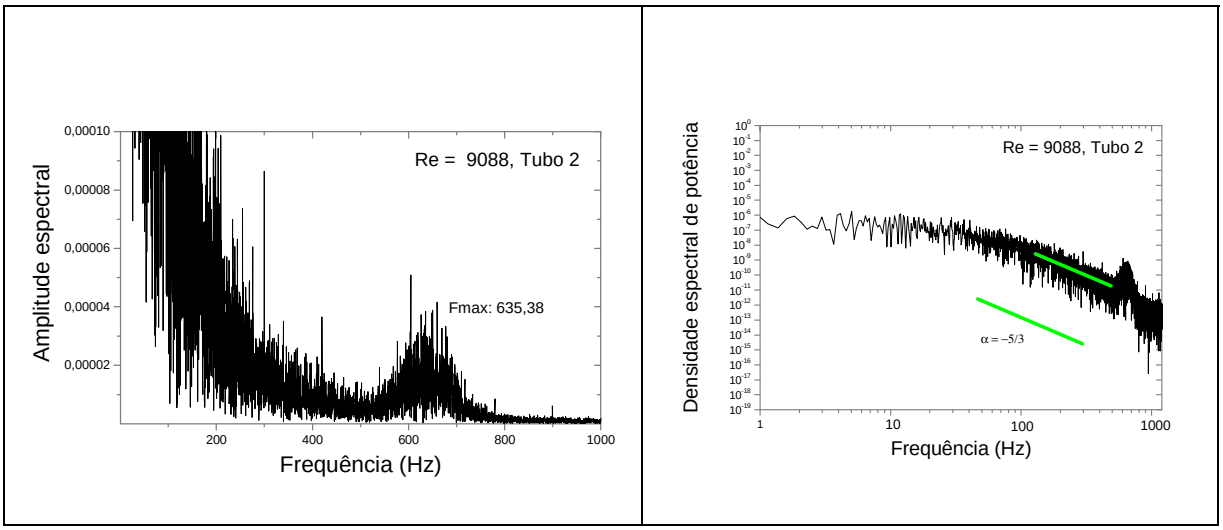


Figura D.49: Gráficos de frequência para o Tratamento IT008.

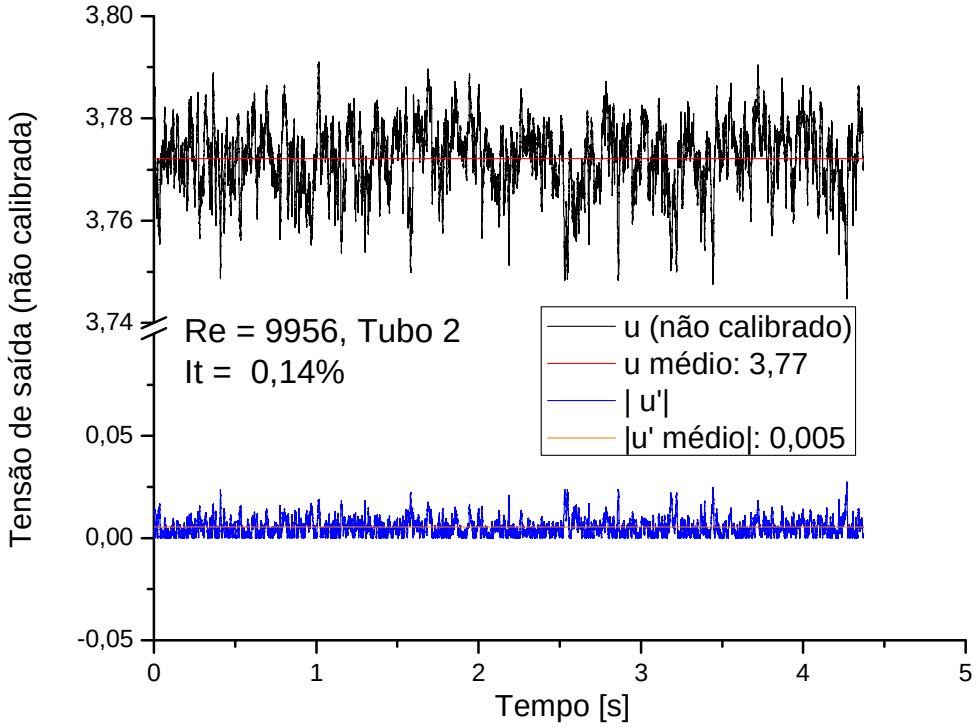


Figura D.50: Gráfico de tensão de saída *versus* tempo para o Tratamento IT009.

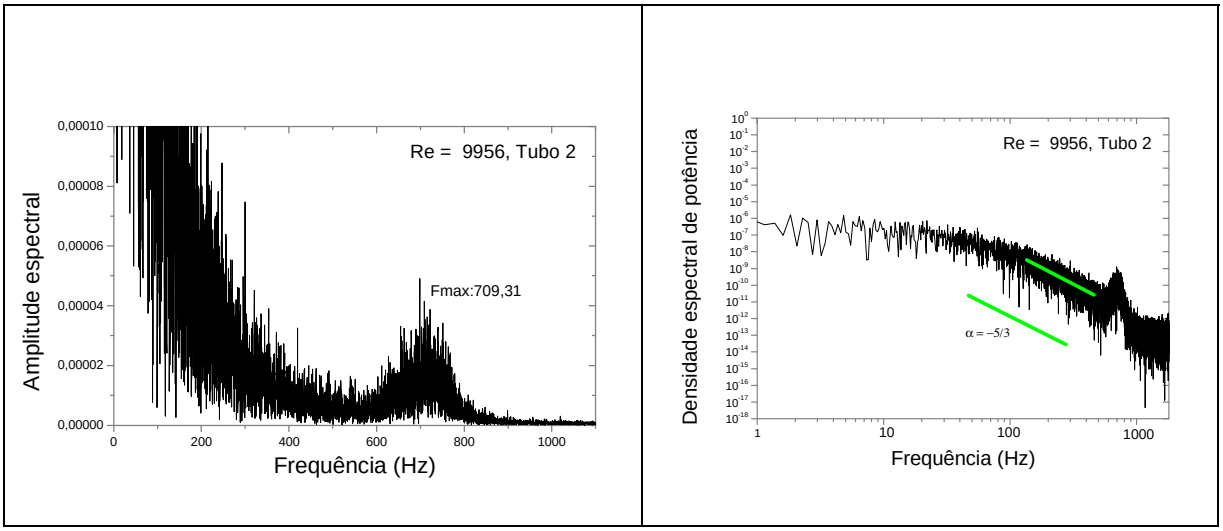


Figura D.51: Gráficos de frequência para o Tratamento IT009.

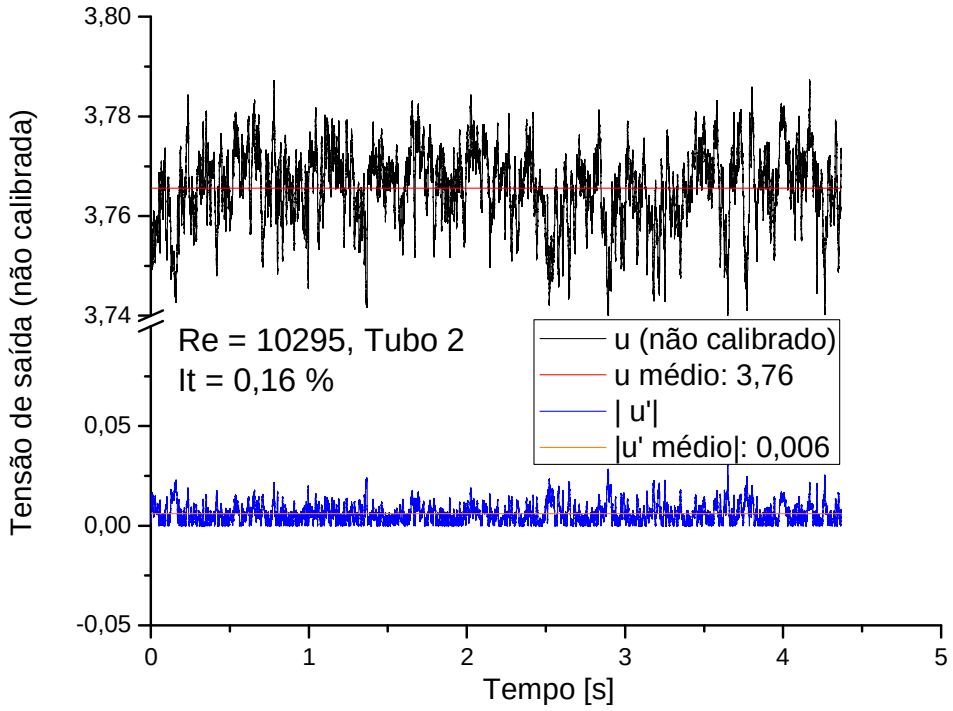


Figura D.52: Gráfico de tensão de saída *versus* tempo para o Tratamento IT010.

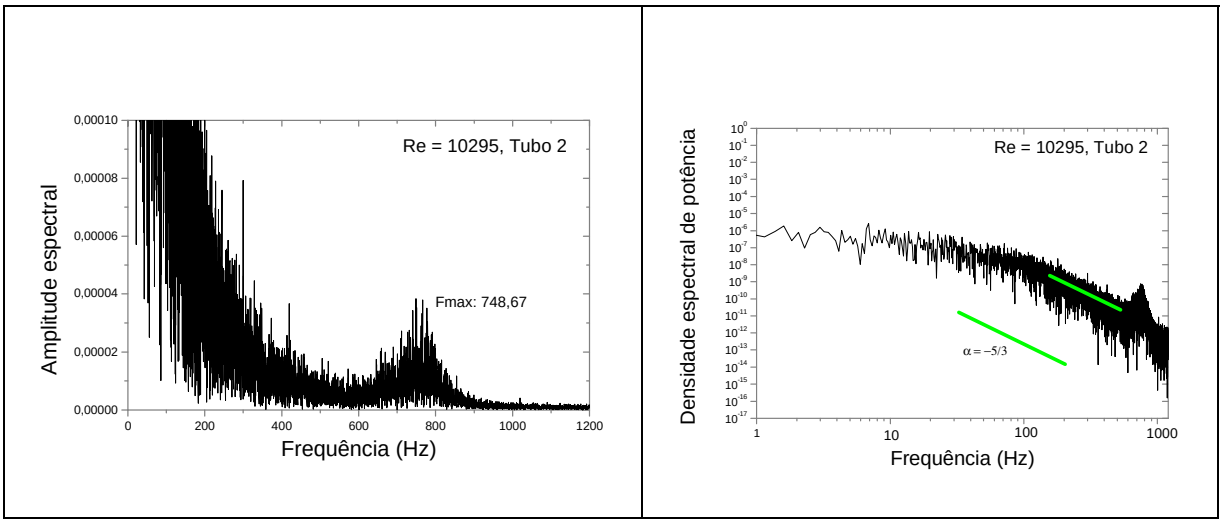


Figura D.53: Gráficos de frequência para o Tratamento IT010.

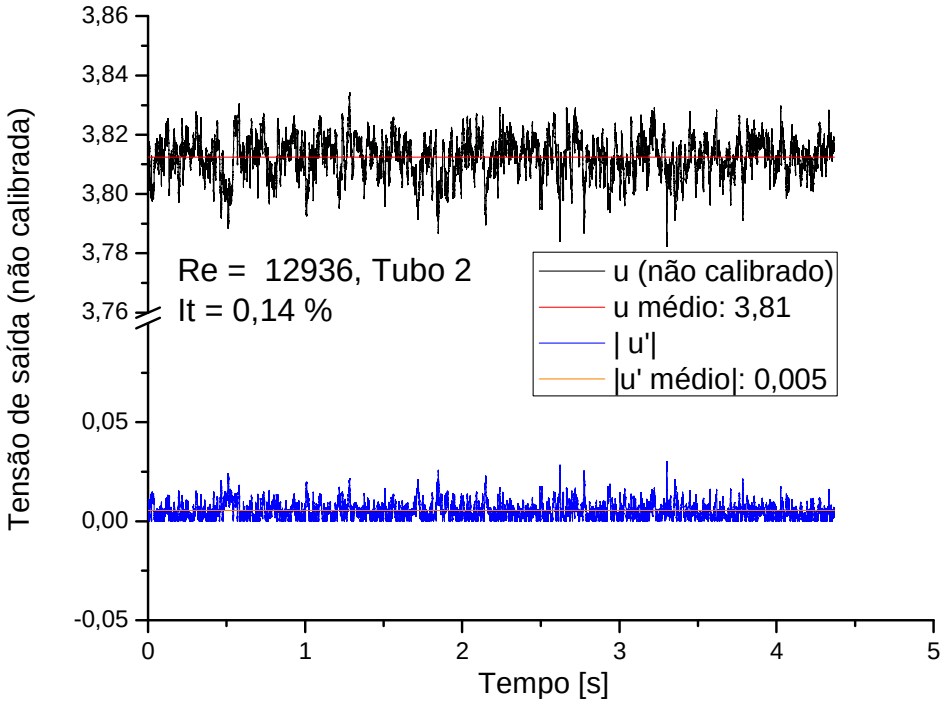


Figura D.54: Gráfico de tensão de saída *versus* tempo para o Tratamento IT011.

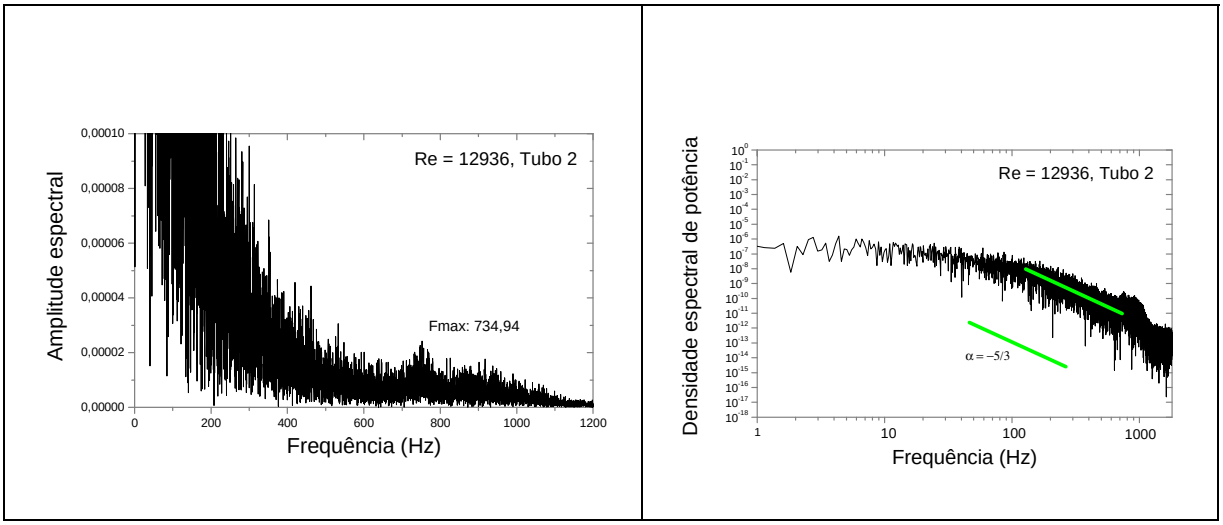


Figura D.55: Gráficos de frequência para o Tratamento IT011.

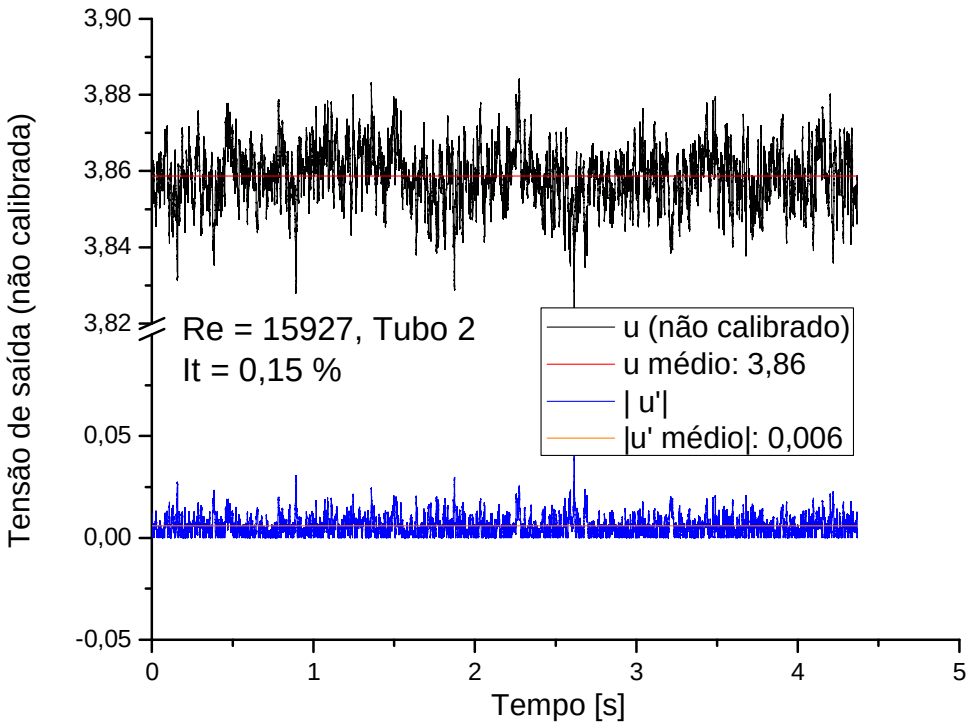


Figura D.56: Gráfico de tensão de saída *versus* tempo para o Tratamento IT012.

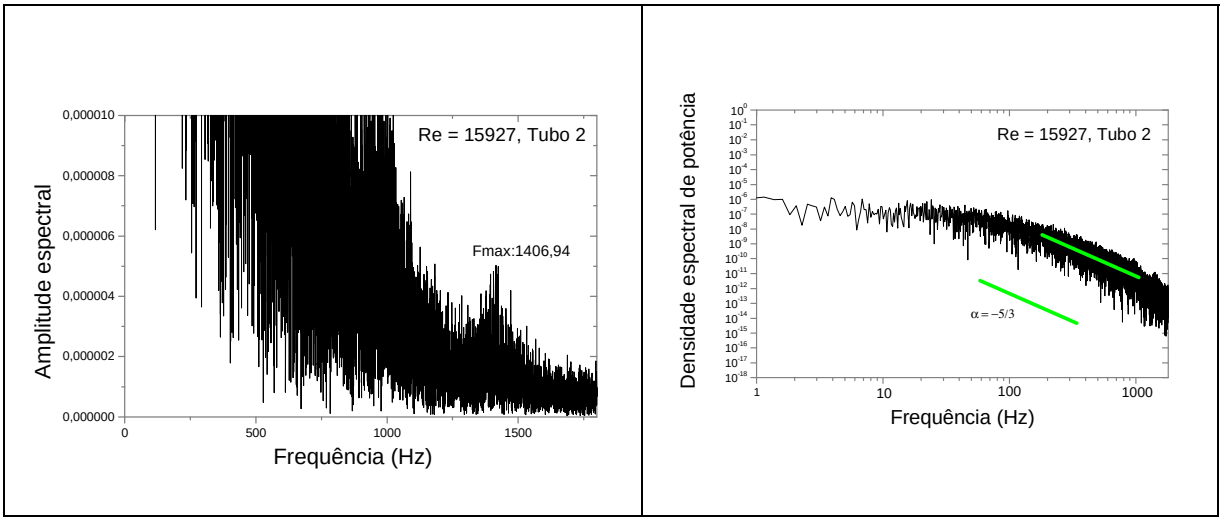


Figura D.57: Gráficos de frequência para o Tratamento IT012.

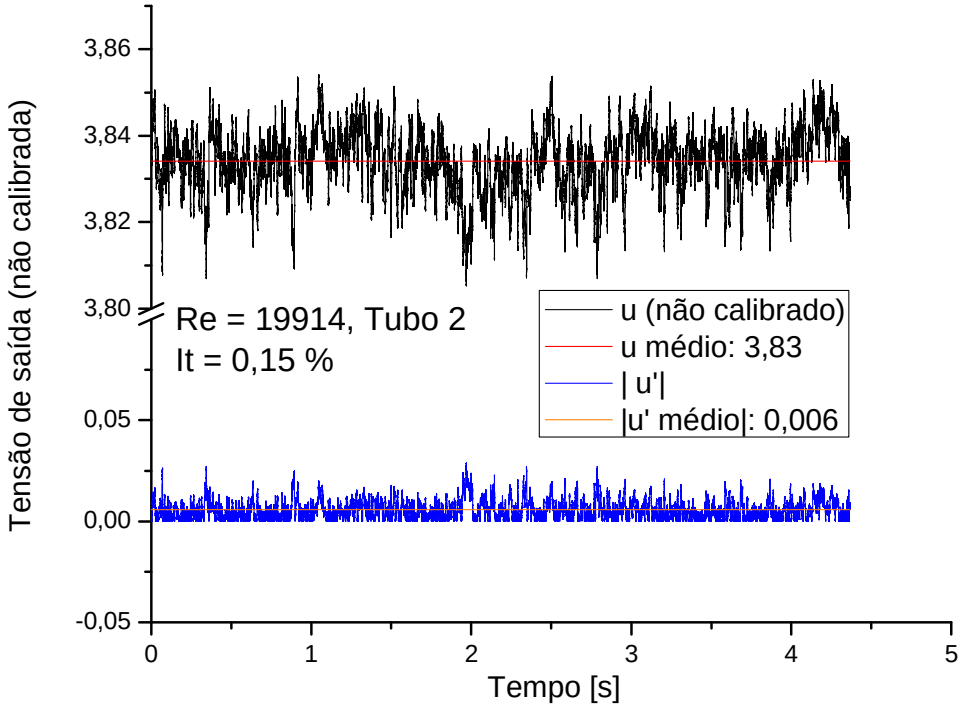


Figura D.58: Gráfico de tensão de saída *versus* tempo para o Tratamento IT013.

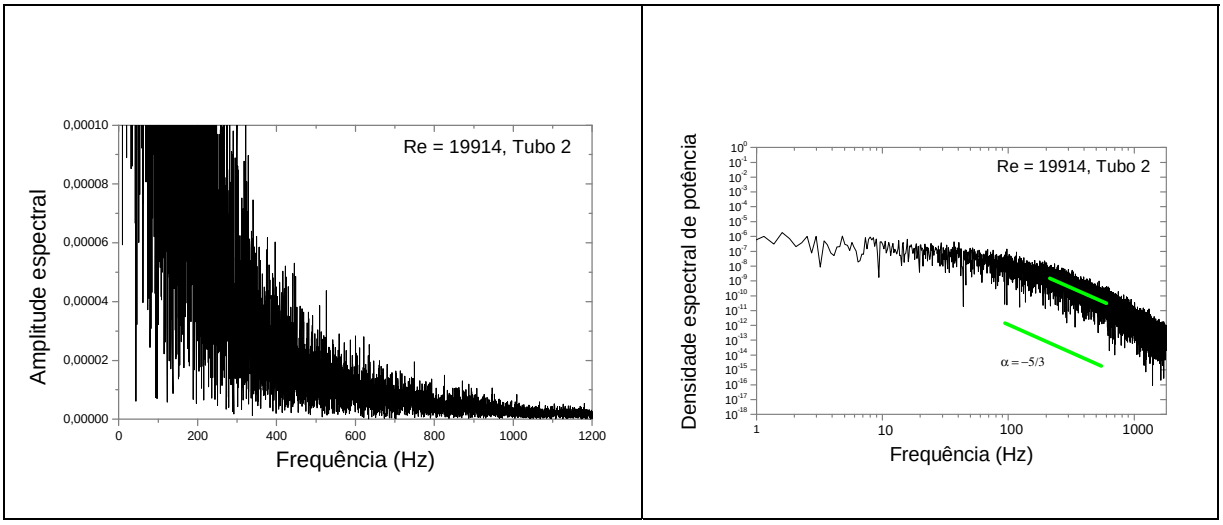


Figura D.59: Gráficos de frequência para o Tratamento IT013.

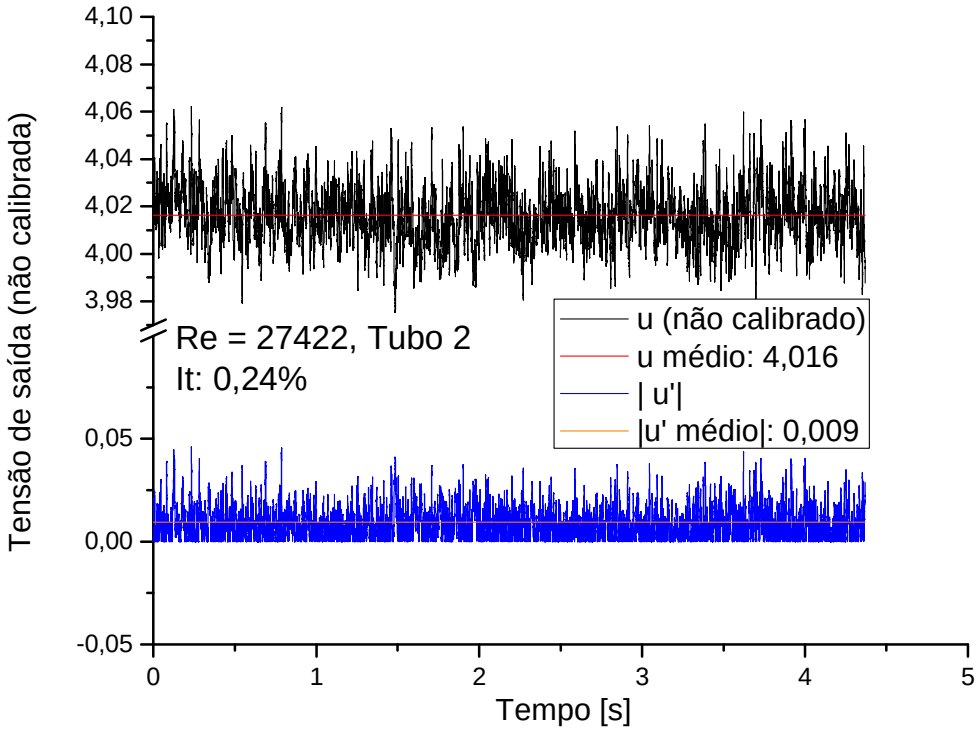


Figura D.60: Gráfico de tensão de saída *versus* tempo para o Tratamento IT014.

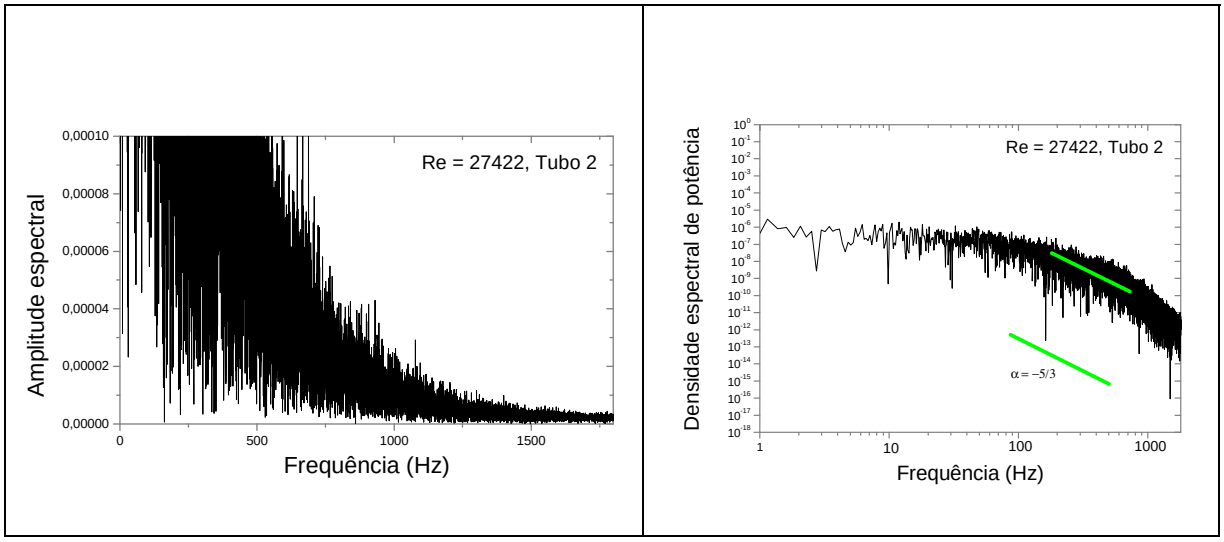


Figura D.61: Gráficos de frequência para o Tratamento IT014.

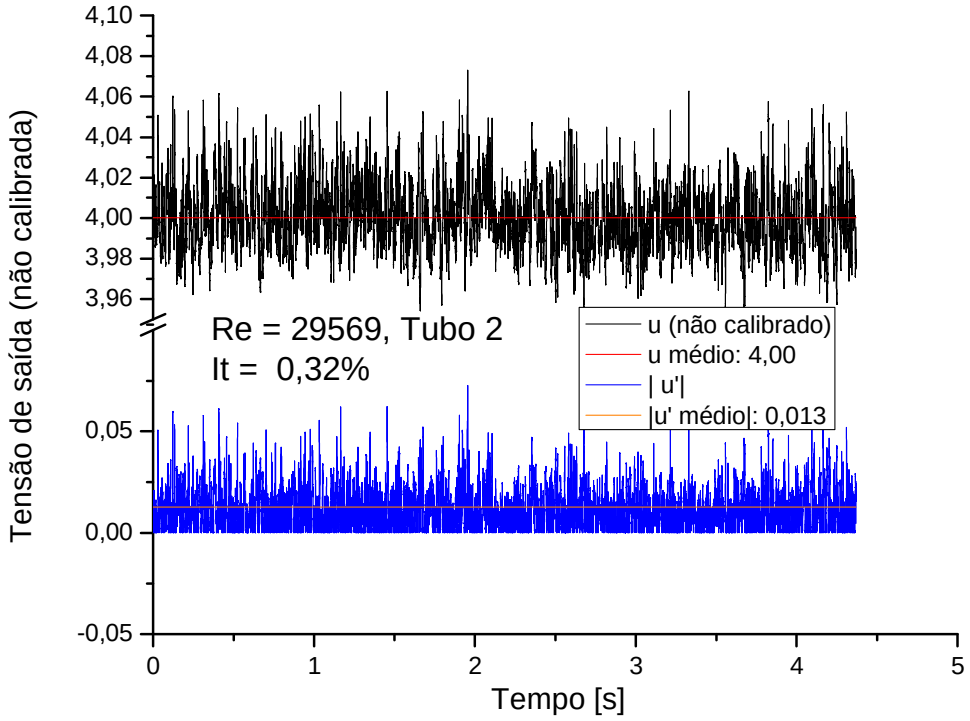


Figura D.62: Gráfico de tensão de saída *versus* tempo para o Tratamento IT015.

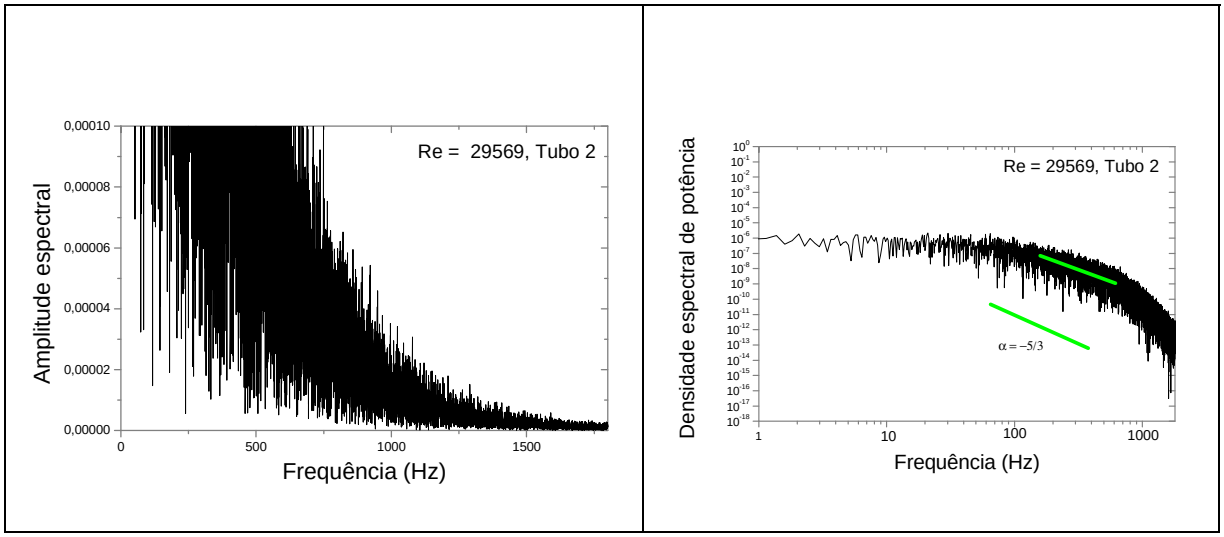


Figura D.63: Gráficos de frequência para o Tratamento IT015.