

JOSÉ ALFEU ALMEIDA
DE SÁ MARQUES

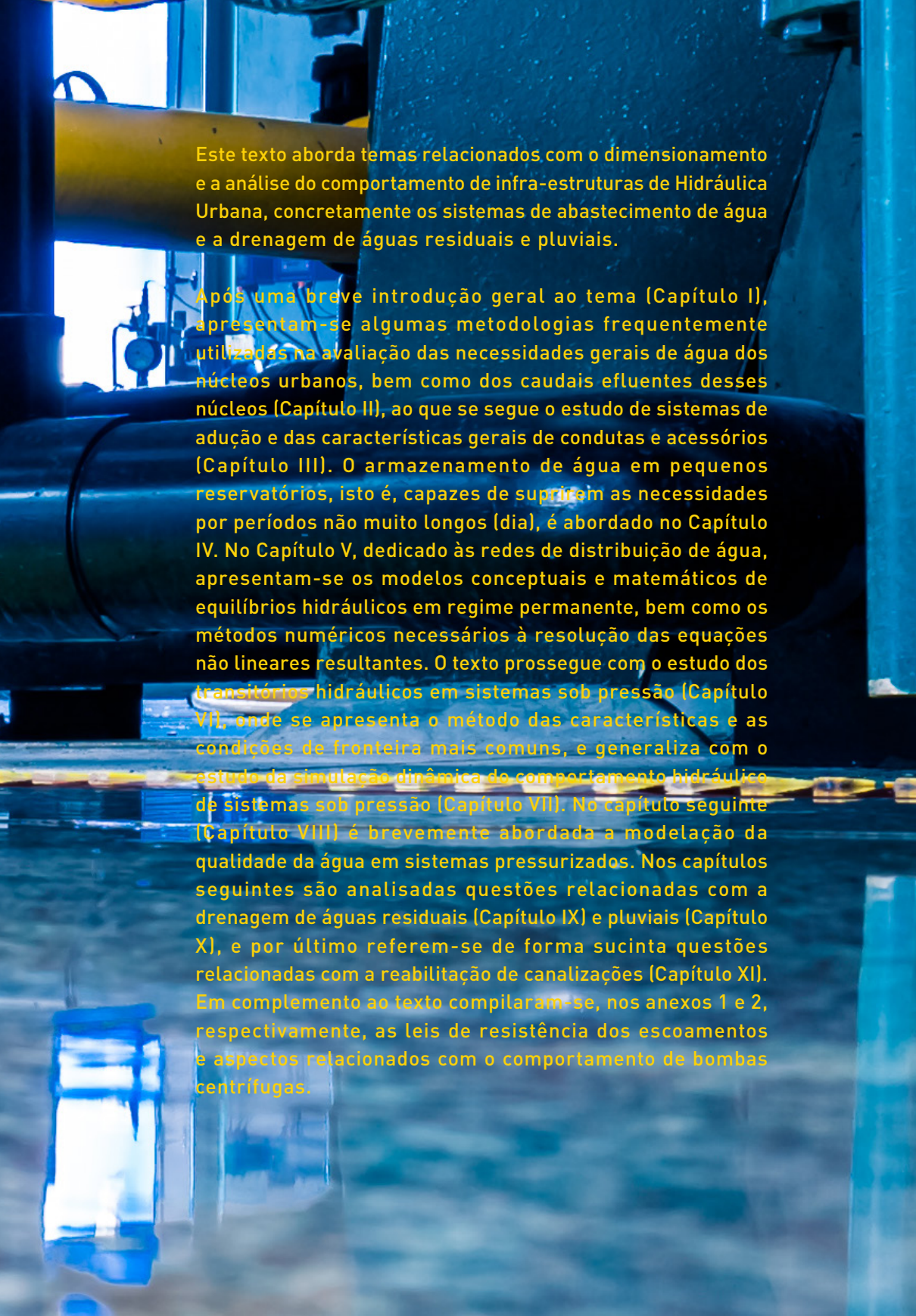
JOAQUIM JOSÉ DE
OLIVEIRA SOUSA

HIDRÁULICA URBANA

4.^a EDIÇÃO

SISTEMAS DE
ABASTECIMENTO
DE ÁGUA E DE
DRENAGEM
DE ÁGUAS RESIDUAIS

IMPRESA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA
COIMBRA UNIVERSITY PRESS



Este texto aborda temas relacionados com o dimensionamento e a análise do comportamento de infra-estruturas de Hidráulica Urbana, concretamente os sistemas de abastecimento de água e a drenagem de águas residuais e pluviais.

Após uma breve introdução geral ao tema (Capítulo I), apresentam-se algumas metodologias frequentemente utilizadas na avaliação das necessidades gerais de água dos núcleos urbanos, bem como dos caudais efluentes desses núcleos (Capítulo II), ao que se segue o estudo de sistemas de adução e das características gerais de condutas e acessórios (Capítulo III). O armazenamento de água em pequenos reservatórios, isto é, capazes de suprir as necessidades por períodos não muito longos (dia), é abordado no Capítulo IV. No Capítulo V, dedicado às redes de distribuição de água, apresentam-se os modelos conceptuais e matemáticos de equilíbrios hidráulicos em regime permanente, bem como os métodos numéricos necessários à resolução das equações não lineares resultantes. O texto prossegue com o estudo dos transitórios hidráulicos em sistemas sob pressão (Capítulo VI), onde se apresenta o método das características e as condições de fronteira mais comuns, e generaliza com o estudo da simulação dinâmica do comportamento hidráulico de sistemas sob pressão (Capítulo VII). No capítulo seguinte (Capítulo VIII) é brevemente abordada a modelação da qualidade da água em sistemas pressurizados. Nos capítulos seguintes são analisadas questões relacionadas com a drenagem de águas residuais (Capítulo IX) e pluviais (Capítulo X), e por último referem-se de forma sucinta questões relacionadas com a reabilitação de canalizações (Capítulo XI). Em complemento ao texto compilaram-se, nos anexos 1 e 2, respectivamente, as leis de resistência dos escoamentos e aspectos relacionados com o comportamento de bombas centrífugas.



E

N

S

I

N

O

EDIÇÃO

Imprensa da Universidade de Coimbra
Email: imprensa@uc.pt
URL: http://www.uc.pt/imprensa_uc
Vendas online: <http://livrariadaimprensa.uc.pt>

COORDENAÇÃO EDITORIAL

Imprensa da Universidade de Coimbra

INFOGRAFIA DA CAPA

Carlos Costa

EXECUÇÃO GRÁFICA

Diário do Minho

ISBN

978-989-26-1609-4

ISBN DIGITAL

978-989-26-1610-0

DOI

<https://doi.org/10.14195/978-989-26-1610-0>

DEPÓSITO LEGAL

/18

1ª Edição • 2006

2ª Edição • 2008

3ª Edição • 2011

1ª Reimpressão • 2012

2ª Reimpressão • 2014

4.^a EDIÇÃO

JOSÉ ALFEU ALMEIDA
DE SÁ MARQUES

JOAQUIM JOSÉ DE
OLIVEIRA SOUSA

HIDRÁULICA URBANA

SISTEMAS DE
ABASTECIMENTO
DE ÁGUA E DE
DRENAGEM
DE ÁGUAS RESIDUAIS

IMPRENSA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA
COIMBRA UNIVERSITY PRESS

ÍNDICE DO TEXTO

Nota prévia da 1ª Edição	xxi
Nota prévia da 2ª Edição	xxiii
Nota prévia da 3ª Edição	xxiv
Nomenclatura	xxv
Acrónimos	xxxiv

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

I.1 – Enquadramento	1
I.2 – Ciclo Hidrológico	4

CAPÍTULO II – ELEMENTOS DE BASE

II.1 – Introdução	7
II.2 – Horizonte de Projecto ou Período de Vida do Projecto	7
II.3 – Estudo da Evolução da População	8
II.3.1 – Dados Disponíveis	9
II.3.2 – Métodos de Projecção Demográfica	10
II.4 – Distribuição da População e Densidades a Considerar	18
II.5 – Necessidades de Água	19
II.5.1 – Consumos Domésticos	20
II.5.2 – Consumos Industriais e Comerciais	24
II.5.3 – Consumos Públicos	27
II.5.4 – Combate a Incêndios	28
II.5.5 – Fugas e Perdas	30
II.5.6 – Considerações Finais	31
II.6 – Variações de Consumo	34
II.6.1 – Variações Diárias	34
II.6.2 – Variações Semanais	34
II.6.3 – Variações Anuais	34
II.6.4 – Variações de Consumo Aplicáveis ao Projecto	35
II.6.5 – Variações de Afluências Aplicáveis ao Projecto	39
II.6.5.1 – Factor de Ponta Horário	39
II.6.5.2 – Caudal de Infiltração	40
II.6.5.3 – Caudal de Águas Residuais	40
II.7 – Cálculo dos Caudais dos Diferentes Componentes dos Sistemas de Abastecimento de Água e de Drenagem de Águas Residuais	41
II.8 – Exemplo de Aplicação	44

III – ADUÇÃO

III.1 – Introdução	51
III.2 – Regras Gerais Sobre Traçado em Planta e em Perfil	54
III.3 – Tipos de Tubos e Juntas	55
III.3.1 – Introdução	55
III.3.2 – Tubos de Fibrocimento	58
III.3.3 – Tubos de Poli(Cloreto de Vinilo) Não Plastificado (PVC)	60
III.3.4 – Tubos de Ferro Fundido	62
III.3.5 – Tubos de PoliEtileno	64
III.3.5 – Outros Tipos de Tubos	65
III.4 – Cálculo de Perdas de Carga em Conduitas	65
III.5 – Estudo Económico de uma Conduita Adutora	65
III.5.1 – Caudal de Dimensionamento	66
III.5.2 – Determinação da Secção mais Económica	68
III.5.2.1 – Adutora Gravítica	69
III.5.2.2 – Conduitas Elevatórias	74
III.5.2.2.1 – Introdução	74
III.5.2.2.2 – Actualização de Custos	75
III.5.2.2.3 – Custo de Investimento	77
III.5.2.2.4 – Custo de Exploração	77
III.5.2.2.5 – Adução Simples	78
III.5.2.2.6 – Adução Mista	80
III.5.3 – Aduções Ramificadas	84
III.6 – Enchimento e Esvaziamento de Conduitas sob Pressão	86
III.7 – Órgãos de Manobra e Segurança	87
III.7.1 – Válvulas de Seccionamento	87
III.7.2 – Válvulas de Retenção	89
III.7.3 – Descargas de Fundo	89
III.7.4 – Ventosas	90
III.7.5 – Dispositivos Redutores de Pressão	91
III.7.6 – Maciços de Amarração	93
III.7.7 – Maciços de Ancoragem	96
III.8 – Largura das Valas	97
III.9 – Assentamento das Tubagens	97
III.10 – Exemplo de Aplicação	98

CAPÍTULO IV – RESERVATÓRIOS

IV.1 – Introdução	113
IV.2 – Classificação e Finalidade dos Reservatórios	113

IV.2.1 – Introdução	113
IV.2.2 – Distribuição Escalonada ou por Andares	116
IV.2.3 – Reservatórios de Compensação e de Extremidade	117
IV.2.4 – Torres de Pressão	118
IV.3 – Localização dos Reservatórios de Origem	119
IV.4 – Cálculo da Capacidade dos Reservatórios	122
IV.4.1 – Reservatórios Intermédios ou de Regularização de Transporte	122
IV.4.2 – Reservatórios de Distribuição	124
IV.4.2.1 – Capacidade de Regularização dos Consumos	124
IV.4.2.2 – Reserva para Avarias na Alimentação	129
IV.4.2.3 – Reserva para Combate a Incêndios	129
IV.4.2.4 – Capacidade Total do Reservatório	130
IV.4.3 – Reservatórios de Compensação e de Extremidade	131
IV.4.4 – Torres de Pressão	132
IV.4.5 – Central Hidropneumática	133
IV.5 – Aspectos Funcionais e Construtivos	136
IV.5.1 – Número de Células	136
IV.5.2 – Forma, Materiais e Processos Construtivos	137
IV.5.3 – Órgãos e Aparelhagem de Operação e Controlo	138
IV.5.3.1 – Dispositivos de Entrada de Água	139
IV.5.3.2 – Dispositivos de Saída de Água	140
IV.5.3.3 – Descarregadores de Superfície e Descargas de Fundo	142
IV.6 – Dimensionamento de um Reservatório de Distribuição	143

CAPÍTULO V – SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

V.1 – Introdução	151
V.2 – Traçado e Tipos de Redes de Distribuição	151
V.3 – Condições Prévias ao Dimensionamento da Rede	154
V.3.1 – Pressões Necessárias nas Conduitas de Distribuição	154
V.3.2 – Velocidades Recomendadas	155
V.3.3 – Caudais de Cálculo	159
V.3.4 – Diâmetros Mínimos	160
V.4 – Caudal de Cálculo de uma Conduita com Distribuição Uniforme de Percurso	161
V.5 – Modelos Matemáticos para Análise de Sistemas de Distribuição de Água	164
V.5.1 – Descrição de Sistemas de Distribuição de Água	164
V.5.2 – Análise e Dimensionamento de Sistemas de Distribuição de Água	166
V.5.3 – Formulação Matemática	167

V.5.3.1 – Formulação com as Equações dos Nós	171
V.5.3.2 – Formulação com as Equações das Malhas	177
V.5.3.3 – Formulação com as Equações dos Troços	183
V.5.4 – Métodos Numéricos de Resolução	186
V.5.4.1 – Resolução de Equações não Lineares pelo Método de Newton	187
V.5.4.2 – Método de Newton Aplicado à Resolução de Sistemas de Equações não Lineares	188
V.5.4.3 – Método de Hardy-Cross (Formulação com as equações das malhas)	189
V.5.4.4 – Método de Newton-Raphson (Formulação com as equações dos nós)	193
V.5.4.5 – Método da Teoria Linear (Formulação com as equações dos troços)	198
V.6 – Acessórios e Elementos Especiais	203
V.7 – Cálculo Hidráulico de um Sistema de Distribuição	208
V.7.1 – Dimensionamento da Rede de Distribuição de Água	209
V.7.2 – Cota de Soleira do Reservatório de Distribuição	216
V.7.3 – Pressões Máximas, Mínimas e Flutuações	216
V.7.4 – Velocidades Mínimas	218
V.7.5 – Verificação das condições com Incêndio	219

CAPÍTULO VI – TRANSITÓRIOS HIDRÁULICOS

VI.1 – Classificação do Escoamento. Definições	221
VI.2 – Introdução	221
VI.3 – Descrição Física do Fenómeno	222
VI.4 – Regimes Variáveis sob Pressão	224
VI.4.1 – Introdução	224
VI.4.2 – Hipóteses Fundamentais Consideradas	224
VI.4.3 – Equações dos Regimes Variáveis sob Pressão	225
VI.4.4 – Desenvolvimento do Método das Características	227
VI.4.5 – Equações em Diferenças Finitas	229
VI.4.6 – Estabilidade do Processo Numérico	232
VI.4.7 – Condições de Fronteira	233
VI.4.7.1 – Generalidades	233
VI.4.7.2 – Reservatório de Nível Constante	233
VI.4.7.3 – Válvula na Extremidade Jusante da Conduta	234
VI.4.7.4 – Sistemas Complexos	235
VI.4.7.5 – Condições de Fronteira Suplementares	240
VI.4.7.5.1 – Reservatório de Montante de Nível Variável	240

VI.4.7.5.2 – Reservatório de Jusante de Nível Variável	241
VI.4.7.5.3 – Nó Genérico Qualquer	241
VI.4.7.5.4 – Bomba Centrífuga	243
VI.4.7.5.4.1 – Introdução	243
VI.4.7.5.4.2 – Regime Variável Provocado pela Operação de Bombas	243
VI.4.7.5.4.3 – Representação Matemática de uma Bomba	244
VI.5 – Análise Simplificada do Choque Hidráulico	248
VI.5.1 – Introdução	248
VI.5.2 – Celeridade	250
VI.5.3 – Adução Gravítica	254
VI.5.4 – Adução por Bombeamento	256
VI.5.4.1 – Introdução	256
VI.5.4.2 – Cálculo do Valor de T_a	256
VI.5.4.2.1 – Método de Mendiluce Rosich	256
VI.5.4.2.2 – Método de Betâmio de Almeida	260
VI.6 – Procedimento a Adoptar	260
VI.7 – Dispositivos para Protecção ao Choque Hidráulico	261
VI.8 – Exemplo de Aplicação	269

CAPÍTULO VII – SIMULAÇÃO DINÂMICA DE SISTEMAS SOB PRESSÃO

VII.1 – Introdução	277
VII.2 – Equações do Movimento	278
VII.3 – Modelos de Simulação Dinâmica	280
VII.3.1 – Introdução	280
VII.3.2 – Modelo Inercial Elástico	281
VII.3.3 – Modelo Inercial Rígido	282
VII.3.4 – Simulação Dinâmica em Regime Quase-Permanente	284
VII.4 – Dimensionamento de um Reservatório de Extremidade	288

CAPÍTULO VIII – MODELAÇÃO MATEMÁTICA DA QUALIDADE EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

VIII.1 – Introdução	291
VIII.2 – Formulação de Base	292
VIII.2.1 – Equação de transporte	292
VIII.2.2 – Equação da Conservação da Massa Aplicada aos Nós do Sistema	293
VIII.2.2.1 – Condições de Fronteira nos Nós	293

VIII.2.2.2 – Condições de Fronteira nos Reservatórios	293
VIII.2.3 – Taxa de Reacção $R[C_i(x,t)]$	294
VIII.3 – Modelos Cinéticos de Decaimento do Cloro	296
VIII.4 – Métodos Numéricos para Resolução dos Sistemas de Equações da Qualidade da Água	299
VIII.4.1 – Modelos Eulerianos	300
VIII.4.1.1 – Método das Diferenças Finitas (FDM – Finite Difference Method)	300
VIII.4.1.2 – Método do Volume Discreto (DVM – Discrete Volume Method)	301
VIII.4.1.3 – Método Dinâmico (DM – Dinamic Method)	304
VIII.4.2 – Modelos Lagrangeanos	305
VIII.4.2.1 – Método Orientado pelo Tempo (TDM – Time Driven Method)	305
VIII.4.2.2 – Método Orientado pelo Evento (EDM – Event Driven Method)	307
VIII.4.3 – Análise Comparativa dos Métodos Numéricos Expostos	308

CAPÍTULO IX – SISTEMAS DE DRENAGEM DE ÁGUAS RESIDUAIS

IX.1 – Introdução	311
IX.2 – Concepção dos Sistemas de Drenagem de Águas Residuais	312
IX.3 – Constituição das Redes de Drenagem de Águas Residuais Domésticas	314
IX.3.1 – Ramais de Ligação	314
IX.3.2 – Colectores, Interceptores e Emissários	315
IX.3.3 – Órgãos Acessórios	316
IX.3.3.1 – Introdução	316
IX.3.3.2 – Câmaras de Visita	316
IX.3.3.3 – Câmaras de Corrente de Varrer	319
IX.3.3.4 – Descarregadores de Tempestade	321
IX.3.3.5 – Sifões Invertidos	322
IX.3.3.6 – Instalações Elevatórias	325
IX.3.3.6.1 – Descarregador	326
IX.3.3.6.2 – Dispositivos de Tratamento Preliminar	326
IX.3.3.6.3 – Câmara de Aspiração	326
IX.3.3.6.3.1 – Introdução	326
IX.3.3.6.3.2 – Cálculo do Volume	328
IX.3.3.6.3.3 – Dimensões Úteis	329

IX.3.3.6.4 – Equipamento Elevatório	330
IX.3.3.6.5 – Conduta Elevatória	332
IX.4 – Estudo do Traçado das Redes de Drenagem	333
IX.5 – Caudais de Projecto	334
IX.6 – Dimensionamento Hidráulico-Sanitário de Sistemas Públicos de Drenagem de Águas Residuais	335
IX.6.1 – Diâmetro Mínimo	335
IX.6.2 – Velocidade Máxima	336
IX.6.3 – Velocidade Mínima	336
IX.6.4 – Altura Máxima	336
IX.6.5 – Inclinação Máxima	336
IX.6.6 – Inclinação Mínima	337
IX.7 – Leis de Resistência	337
IX.8 – Verificação das Imposições Regulamentares	338
IX.9 – Implantação dos Colectores	341
IX.10 – Profundidades e Cotas de Soleira nas Câmaras de Visita	343
IX.11 – Cálculo das Condições do Escoamento	344
IX.12 – Verificação estrutural de tubagens enterradas	344
IX.12.1 – Avaliação das acções exercidas sobre tubagens Enterradas	345
IX.12.1.1 – Acção do solo	345
IX.12.1.2 – Acção do tráfego	352
IX.12.2 – Condições de assentamento das tubagens	356
IX.12.3 – Verificação da segurança	358
IX.13 – Dimensionamento de um Sistema de Drenagem Residual	358

CAPÍTULO X – SISTEMAS DE DRENAGEM DE ÁGUAS PLUVIAIS

X.1 – Introdução	365
X.2 – Caudal de Águas Pluviais	365
X.3 – Tempo de Concentração	366
X.3.1 – Introdução	366
X.3.2 – Métodos Semi-empíricos ou Cinemáticos	369
X.3.2.1 – Fórmula de Kirpich	369
X.3.3.2 – Método do Soil Conservation Service (SCS)	370
X.3.3 – Tempo de Concentração em Sistemas de Drenagem Urbana	371
X.4 – Intensidade da Chuvada	372
X.4.1 – Curva Exponencial	373
X.4.2 – Curva Hiperbólica	373

X.4.3 – Regiões Pluviométricas e Parâmetros das Curvas I-D-F	373
X.5 – Tempo de Recorrência ou Período de Retorno	375
X.6 – Coeficiente de Escoamento	376
X.7 – Avaliação do Caudal	380
X.7.1 – Método Racional	380
X.7.2 – Método Soil Conservation Service SCS	380
X.8 – Cálculo Hidráulico dos Colectores	385
X.9 – Colectores, Galerias e Órgãos Acessórios	386
X.9.1 – Introdução	386
X.9.2 – Dispositivos de Entrada	386
X.9.3 – Dispositivos de Saída	390
X.10 – Dimensionamento de um Sistema de Drenagem Pluvial	391
CAPÍTULO XI – REABILITAÇÃO DE CONDUTAS	
XI.1 – Introdução	397
XI.2 – Reabilitação de Condutas	399
XI.3 – Técnicas para Reabilitação de Condutas	401
ANEXO I – CÁLCULO DE PERDAS DE CARGA	
AI.1 – Introdução	413
AI.2 – Perdas de Carga Contínuas	414
AI.3 – Cálculo de Perdas de Carga Localizadas	422
ANEXO II – INSTALAÇÕES ELEVATÓRIAS	
AII.1 – Introdução	429
AII.2 – Altura Geométrica e Altura Total de Elevação	430
AII.3 – Curvas Características de Bombas	431
AII.3.1 – Introdução	431
AII.3.2 – Curva de Carga/Energia	432
AII.3.3 – Curva de Rendimento	433
AII.3.4 – Curva de Potência	434
AII.3.5 – Curva de NPSH	434
AII.4 – Ponto de Funcionamento de uma Bomba	436
AII.5 – Associação de Bombas em Paralelo e em Série	437
AII.5.1 – Introdução	437
AII.5.2 – Associação de Bombas em Paralelo	438
AII.5.3 – Associação de Bombas em Série	441
AII.6 – Potência Eléctrica e Consumo de Energia	442
AII.7 – Bombas com Velocidade de Rotação Variável	443
BIBLIOGRAFIA	447

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I.1: Ciclo hidrológico natural e ciclo “urbano”	6
Figura II.1: Crescimento aritmético	11
Figura II.2: Crescimento geométrico	11
Figura II.3: Curva Logística	16
Figura II.4: Capitações médias globais	33
Figura II.5: Esquema de um sistema de abastecimento de água e drenagem de águas residuais	42
Figura II.6: Variação diária dos consumos industriais	45
Figura II.7: Demografia do passado e previsão de evolução futura	46
Figura III.1: Esquema de um sistema adutor	53
Figura III.2: Perfil de uma adutora em terreno horizontal	55
Figura III.3: Cálculo da espessura de um tubo	56
Figura III.4: Junta Comet	59
Figura III.5: Junta Gibault simples	59
Figura III.6: Junta Gibault de transição	59
Figura III.7: Pressões admissíveis em função da temperatura	61
Figura III.8: Junta integral (PVC)	61
Figura III.9: Junta automática (Standard)	63
Figura III.10: Juntas travadas	63
Figura III.11: Juntas flangeadas	63
Figura III.12: Junta mecânica (Express)	63
Figura III. 13: Aproveitamento total da carga disponível	70
Figura III. 14: Adutora em série	71
Figura III. 15: Existência de um ponto alto no perfil da adutora	72
Figura III.16: Alternativa correspondente a um reservatório intermédio	74
Figura III.17: Variação dos custos com o diâmetro	75
Figura III.18: Adução mista (bombeamento - gravítica)	80
Figura III.19: Adução mista (gravítica - bombeamento)	81
Figura III.20: Adução gravítica	86
Figura III.21: Comando de válvulas de seccionamento	88
Figura III.22: Válvula de seccionamento com "by-pass"	88
Figura III.23: Válvula de retenção	89
Figura III.24: Ventosas	90
Figura III.25: Válvula redutora de pressão	91
Figura III.26: Câmara de perda de carga	92
Figura III.27: Cálculo dos impulsos nos maciços de amarração	93
Figura III.28: Definição da forma dos maciços de amarração	94

Figura III.29: Maciços de amarração para curvas em perfil	96
Figura III.30: Maciços de ancoragem	96
Figura III.31: Valas para assentamento de tubagens	97
Figura III.32: Diagrama esquemático do sistema adutor	98
Figura III.33: Perfil longitudinal e linha piezométrica mínima da conduta adutora	103
Figura IV.1: Esquema de uma adução mista	114
Figura IV.2: Reservatório de distribuição	114
Figura IV.3: Tipos de reservatórios	115
Figura IV.4: Distribuição escalonada ou por andares	116
Figura IV.5: Esquema com reservatório de compensação	117
Figura IV.6: Piezométricas num sistema de distribuição com reservatório de extremidade	118
Figura IV.7: Esquema de funcionamento de um reservatório elevado	118
Figura IV.8: Torre de pressão	119
Figura IV.9: Esquema de funcionamento de uma torre de pressão	119
Figura IV.10: Localização “ideal” do reservatório	120
Figura IV.11: Captação a cota superior à da distribuição	121
Figura IV.12: Captação a cota inferior à da distribuição	121
Figura IV.13: Volume de regularização de transporte	122
Figura IV.14: Esquema de uma adução mista	123
Figura IV.15: Cálculo da capacidade	125
Figura IV.16: Diagrama de consumos (factor de ponta 4.0)	126
Figura IV.17: Diagrama de consumos (factor de ponta 3.0)	126
Figura IV.18: Diagrama de consumos (factor de ponta 2.4)	127
Figura IV.19: Diagrama de consumos (factor de ponta 2.0)	127
Figura IV.20: Diagrama de caudais acumulados	128
Figura IV.21: Diagrama de CHERRE	128
Figura IV.22: Piezométricas num sistema de distribuição com reservatório de compensação	131
Figura IV.23: Desenho esquemático de um reservatório hidropneumático	134
Figura IV.24: Reservatório de distribuição com duas células	137
Figura IV.25: Representação esquemática da entrada no reservatório	140
Figura IV.26: Representação das condutas à entrada e saída do Reservatório	141
Figura IV.27: Caudalímetro electro-magnético	141
Figura IV.28: Saída do reservatório com uma válvula de tanque	142
Figura IV.29: Diagrama dos consumos domésticos	144
Figura IV.30: Diagrama dos consumos acumulados	146

Figura IV.31: Diagrama dos consumos totais acumulados vs. aduzidos acumulados	146
Figura IV.32: Diagrama de Cherre	147
Figura V.1: Representação esquemática dos diferentes tipos de redes	152
Figura V.2: Rede por andares	153
Figura V.3: Conduta com distribuição uniforme de percurso	161
Figura V.4: Modelo de escoamento variado numa conduta com distribuição de percurso	163
Figura V.5: Modelo de escoamento uniforme equivalente	163
Figura V.6: Conduta com distribuição de percurso	163
Figura V.7: Representação esquemática de um troço e respectivos nós de extremidade	164
Figura V.8: Representação esquemática dos diferentes tipos de nós	165
Figura V.9: Verificação da relação $M = T - N - (F-1)$	166
Figura V.10: Nó genérico i do sistema (convenção de sinais)	168
Figura V.11: Conduta genérica definida pelos nós i e j	169
Figura V.12: Exemplo de uma rede ramificada	170
Figura V.13: Exemplo para a formulação com as equações dos nós	172
Figura V.14: Inclusão de estações elevatórias e sobrepessoras na formulação dos nós	174
Figura V.15: Inclusão de válvulas redutoras de pressão na formulação dos nós	176
Figura V.16: Exemplo para a formulação com as equações das malhas	178
Figura V.17: Exemplo para a formulação com as equações das malhas (malha fictícia)	179
Figura V.18: Inclusão de válvulas redutoras de pressão na formulação das malhas (válvula instalada num troço pertencente a uma malha)	182
Figura V.19: Inclusão de válvulas redutoras de pressão na formulação das malhas (válvula instalada num troço comum a duas malhas)	183
Figura V.20: Inclusão de válvulas redutoras de pressão na formulação dos troços	186
Figura V.21: Representação gráfica do método de Newton	187
Figura V.22: Exemplo de aplicação do método de Hardy-Cross	192
Figura V.23: Arbítrio de caudais	192
Figura V.24: Exemplo de aplicação do método de Newton-Raphson	195
Figura V.25: Exemplo de aplicação do método da Teoria Linear	200
Figura V.26: Válvulas de seccionamento	204
Figura V.27: Descarga de fundo	205
Figura V.28: Ventosas	205
Figura V.29: Válvula redutora de pressão	206
Figura V.30: Boca de rega e de lavagem	207

Figura V.31: Marco de água	207
Figura V.32: Diagrama esquemático da rede de distribuição	208
Figura VI.1: Sistema reservatório/conduto/válvula	222
Figura VI.2: Representação gráfica das linhas características	229
Figura VI.3: Malha de cálculo para o método das características	229
Figura VI.4: Malha de características, com intervalos de tempo especificados	232
Figura VI.5: Fronteiras de montante e jusante	233
Figura VI.6: Sistema constituído por reservatório, conduta e válvula	235
Figura VI.7: Ligação em série de duas condutas	236
Figura VI.8: Junção de várias condutas	237
Figura VI.9: Reservatório de montante de nível variável	240
Figura VI.10: Reservatório de jusante de nível variável	241
Figura VI.11: Caudal equivalente	242
Figura VI.12: Nó genérico i do sistema (convenção de sinais)	242
Figura VI.13: Nó genérico com uma bomba centrífuga	247
Figura VI.14: Variação, para diferentes materiais, da celeridade com a relação D/e	253
Figura VI.15: Esquema de uma adução gravítica	254
Figura VI.16: Corte esquemático de uma válvula de adufa	255
Figura VI.17: Energias envolvidas na anulação do escoamento	257
Figura VI.18: Impulsão curta (manobra lenta)	260
Figura VI.19: Impulsão longa (manobra rápida)	261
Figura VI.20: Volante de inércia acoplado às bombas	262
Figura VI.21: Dimensões para o calculo do volante de inércia	262
Figura VI.22: Funcionamento de uma chaminé de equilíbrio	263
Figura VI.23: Corte de um reservatório de ar comprimido – RAC	265
Figura VI.24: Funcionamento de um reservatório de ar comprimido	265
Figura VI.25: Corte de uma válvula de retenção	267
Figura VI.26: Funcionamento de uma impulsão longa com uma válvula de retenção	267
Figura VI.27: Corte esquemático de uma válvula de alívio	268
Figura VI.28: Funcionamento esquemático de uma bomba reversível	268
Figura VI.29: Esquema de um “by pass” à bomba	269
Figura VI.30: Perfil longitudinal esquemático de um sistema adutor	269
Figura VI.31: Envoltentes das linhas piezométricas da adução com bombeamento para o $\phi 250$	272
Figura VI.32: Envoltentes das linhas piezométricas da adução com bombeamento para o $\phi 315$	274

Figura VII.1: Modelos de simulação dinâmica de sistemas sob pressão	278
Figura VII.2: Representação esquemática de um sistema reservatório/conduto/ reservatório	281
Figura VII.3: Variação dos níveis dos reservatórios no tempo, calculados com o modelo inercial elástico	282
Figura VII.4: Variação dos níveis dos reservatórios no tempo, calculados com o modelo inercial rígido	283
Figura VII.5: Fluxograma de um modelo do tipo quase-permanente	286
Figura VII.6: Variação dos níveis dos reservatórios no tempo, calculados com o modelo quase-permanente	286
Figura VII.7: Caudal/tempo para os diferentes modelos de simulação dinâmica	287
Figura VII.8: Pormenor de caudal/tempo para os diferentes modelos de simulação dinâmica	287
Figura VII.9: Esquema de um sistema de distribuição com um reservatório de extremidade	288
Figura VII.10: Diagrama de consumos nos nós	289
Figura VII.11: Variação temporal do nível de água no reservatório de montante	290
Figura VII.12: Variação temporal do nível de água no reservatório de jusante	290
Figura VIII.1: Esquema gráfico correspondente à discretização do método FDM	301
Figura VIII.2: Transporte da massa na conduta, passo a passo	304
Figura VIII.3 – Gráfico genérico com a discretização feita pelo método DM	305
Figura VIII.4 – Comportamento dos segmentos utilizando Métodos Lagrangeanos	306
Figura IX.1: Sistema do tipo unitário	313
Figura IX.2: Sistema do tipo separativo	313
Figura IX.3: Inserção de ramais de ligação na rede de drenagem pública por meio de forquilha simples	314
Figura IX.4: Interceptor e Emissário	315
Figura IX.5: Câmara de visita de passagem ou de mudança de direcção	317
Figura IX.6: Câmara de visita de queda livre ou guiada	317
Figura IX.7: Câmara de visita de passagem e de junção	318
Figura IX.8: Coberturas de câmaras de visita	318
Figura IX.9: Tubagem de Inspeção e Limpeza (TIL)	319
Figura IX.10: Câmara de corrente de varrer de funcionamento manual	320

Figura IX.11: Câmara de corrente de varrer de funcionamento automático	321
Figura IX.12: Exemplo de descarregador de tempestade	322
Figura IX.13: Sifão invertido	323
Figura IX.14: Desenho esquemático de um sifão invertido	324
Figura IX.15: Corte esquemático de uma elevatória convencional com bombas de eixo horizontal	325
Figura IX.16: Posicionamento dos grupos de bombeamento	327
Figura IX.17: Formas de sucção e respectivas submergências	330
Figura IX.18: Instalações elevatórias com bombas de eixo horizontal e vertical	331
Figura IX.19: Instalação elevatória com bombas submersíveis	331
Figura IX.20: Situação 1 – Terreno plano (não se atinge o recobrimento mínimo a jusante)	341
Figura IX.21: Situação 2 – Terreno inclinado (atinge-se o recobrimento mínimo a jusante)	342
Figura IX.22: Situação 3 – Terreno muito inclinado (necessita de queda a montante)	343
Figura IX.23: Implantação dos colectores	344
Figura IX.24: Cargas exercidas em tubagens enterradas	345
Figura IX.25: Exemplo de demonstração da teoria de Marston-Spangler	347
Figura IX.26: Gráfico para determinação do coeficiente de carga	349
Figura IX.27: Carga exercida pelo solo sobre tubagens rígidas assentes em vala	350
Figura IX.28: Largura da vala a usar no cálculo da carga exercida pelo solo	351
Figura IX.29: Planta do veículo-tipo e cruzamento de veículos para efeitos do cálculo de cargas sobre tubagens enterradas	352
Figura IX.30: Carga exercida por cada roda isolada e área de Aplicação	353
Figura IX.31: Combinações para o cálculo de cargas sobre tubagens enterradas	353
Figura IX.32: Degradação e sobreposição das cargas exercidas pelas rodas dos veículos	354
Figura IX.33: Comprimento efectivo do apoio para tubagens rígidas	356
Figura IX.34: Tipos de assentamento de tubagens em vala	357
Figura IX.35: Esquema da rede de drenagem	359
Figura IX.36: Perfis longitudinais dos colectores	364
Figura X.1: Hidrograma elementar para $t_p > t_c$	367
Figura X.2: Hidrograma elementar para $t_p = t_c$	367

Figura X.3: Hidrograma elementar para $t_p < t_c$	368
Figura X.4: Factor correctivo do tempo de atraso relativo à melhoria das condições hidráulicas do escoamento	371
Figura X.5: Factor correctivo do tempo de atraso relativo à percentagem de área impermeável	371
Figura X.6: Regiões pluviométricas e respectivos parâmetros das curvas I-D-F	374
Figura X.7: Procedimento para estimar o coeficiente de escoamento	379
Figura X.8: Caixa de ramal simples de ligação à rede pluvial	386
Figura X.9: Caixa de ramal com queda guiada de ligação à rede pluvial	387
Figura X.10: Caixa de ramal de ligação à rede pluvial enterrada	387
Figura X.11: Sumidouro de valeta com retenção de areias	388
Figura X.12: Sumidouro de lancil com retenção de areias	388
Figura X.13: Sumidouro de lancil com saída directa	389
Figura X.14: Sumidouro de lancil com saída sifonada	389
Figura X.15: Pormenores de sumidouros	390
Figura X.16: Boca de saída directa	390
Figura X.17: Boca de saída com dissipação de energia	391
Figura X.18: Esquema da rede de drenagem	391
Figura X.19: Perfis longitudinais dos colectores	395
Figura XI.1: Diferentes modelos de tampões raspadores (pigs)	379
Figura XI.2: Exemplo de raspador para a técnica drag scraping	379
Figura XI.3: Exemplo de raspador para a técnica pressure sraping	380
Figura XI.4: Revestimento interior com argamassa de cimento (cement mortar lining)	381
Figura XI.5: Revestimento interior com resinas epoxi (epoxi resin lining)	381
Figura XI.6: Esquema de aplicação da técnica swagelining	382
Figura XI.7: Conduta em forma de U para aplicação de técnica close-fit lining.	383
Figura XI.8: Esquema de aplicação da técnica pipebursting	384
Figura XI.9: Esquema de aplicação da microtunelagem	385
Figura XI.10: Equipamento para executar a técnica horizontal directional drilling	386
Figura XI.11: Robot dotado de equipamento de vídeo para inspecção de condutas	387
Figura AI. 1: Válvula de cunha	424

Figura AI. 2: Válvula de borboleta	425
Figura AI. 3: Corte de uma válvula esférica	426
Figura AI. 4: Válvula de retenção	427
Figura AII. 1: Diferentes tipos de bombas centrífugas	429
Figura AII. 2: Altura geométrica e respectivas componentes	430
Figura AII. 3: Curvas características de uma bomba	432
Figura AII. 4: Ponto de funcionamento de uma bomba	437
Figura AII. 5: Associação de bombas em paralelo	438
Figura AII. 6: Associação de bombas em paralelo – curva da instalação “inclinada”	440
Figura AII. 7: Associação de bombas em paralelo – curva da instalação “plana”	440
Figura AII. 8: Associação de bombas em série	441
Figura AII. 9: Bombas com velocidade de rotação variável	445

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro II.1: Horizontes de projecto em obras de saneamento básico	8
Quadro II.2: Densidades populacionais	19
Quadro II.3: Distribuição média do consumo global pelos diferentes usos	20
Quadro II.4: Distribuição média do consumo doméstico pelos diferentes usos	21
Quadro II.5: Água necessária para instalações pecuárias	24
Quadro II.6: Consumos em matadouros públicos ou privados	24
Quadro II.7: Consumos em indústrias de leite e seus derivados	25
Quadro II.8: Consumos em hotéis, pensões e hospedarias	25
Quadro II.9: Consumos em restaurantes	25
Quadro II.10: Consumos em bares, cafés e similares	25
Quadro II.11: Consumos em estações de serviço e oficinas	26
Quadro II.12: Consumos em lavandarias, tinturarias e similares	26
Quadro II.13: Consumos em escolas e residências de estudantes	27
Quadro II.14: Consumos em hospitais, clínicas, consultórios e similares	27
Quadro II.15: Consumos em recintos de espectáculos	28
Quadro II.16: Consumos em piscinas	28
Quadro II.17: Caudais para combate a incêndio e respectivas durações (EUA)	30
Quadro II.18: Factores de ponta horários (abastecimento de água) para diferentes populações	38
Quadro II.19: Factores de ponta horários (sistemas de drenagem) para diferentes populações	39
Quadro II.20: Censos populacionais existentes e respectivos valores de população	44
Quadro II.21: Previsão da evolução da população ao longo do horizonte de projecto	46
Quadro II.22: Evolução dos caudais domésticos ao longo do horizonte de projecto	47
Quadro II.23: Evolução dos caudais do hotel ao longo do horizonte de projecto	48
Quadro II.24: Evolução dos caudais da indústria ao longo do horizonte de projecto	48
Quadro II.25: Evolução das fugas ao longo do horizonte de projecto	48
Quadro II.26: Evolução dos caudais totais (do abastecimento de água) ao longo do horizonte de projecto	49
Quadro II.27: Evolução dos caudais totais (do sistema de drenagem	

de águas residuais) ao longo do horizonte de projecto	49
Quadro III.1: Valores da deflexão angular para condutas de fibrocimento	60
Quadro III.2: Valores da deflexão angular para condutas de ferro fundido	64
Quadro III.3: Características e custos das condutas	105
Quadro III.4: Caudais, perdas de carga, alturas totais de elevação e potências	106
Quadro III.5: Cálculo do somatório dos custos de energia actualizados ao ano 0 para cada uma das soluções admissíveis ($\phi 250$ mm, $\phi 315$ mm)	108
Quadro III.6: Custos globais para cada uma das soluções admissíveis ($\phi 250$ mm, $\phi 315$ mm)	109
Quadro IV.1: Cálculo dos caudais saídos de R_1 ao longo do dia (m^3)	144
Quadro IV.2: Cálculo dos caudais entrados em R_1 e flutuações ao longo do dia (m^3)	145
Quadro IV.3: Cálculo do volume de regularização com avaria (m^3)	148
Quadro V.1: Velocidades e caudais máximos (Poli(Cloreto de Vinilo) não plastificado – PVC10)	157
Quadro V.2: Velocidades e caudais máximos (Polietileno de Alta Densidade – PEAD MRS/PE80)	157
Quadro V.3: Velocidades e caudais máximos (Fibrocimento)	158
Quadro V.4: Velocidades e caudais máximos (Ferro Fundido Dúctil)	158
Quadro V.5: Cálculo do equilíbrio hidráulico para o exemplo da figura V.23	193
Quadro V.6: Valores de K_{ij} para o exemplo da figura V.24	196
Quadro V.7: Coeficientes de perda de carga	201
Quadro V.8: Características da rede esquematizada.	209
Quadro V.9: Cálculos preliminares ao dimensionamento da rede	210
Quadro V.10: Cálculo dos caudais de percurso das condutas (Ano 40)	211
Quadro V.11: Estimativa inicial de caudais	211
Quadro V.12: Velocidades e caudais máximos para condutas em PVC	212
Quadro V.13: Pré-dimensionamento das condutas	212
Quadro V.14: Primeira iteração do Método de Hardy-Cross	213
Quadro V.15: Segunda iteração do Método de Hardy-Cross	214
Quadro V.16: Quinta iteração do Método de Hardy-Cross	214
Quadro V.17: Caudais finais e perdas de carga (Ano 40)	215
Quadro V.18: Verificação da velocidade máxima	215
Quadro V.19: Cota de soleira (mínima e máxima)	216

Quadro V.20: Pressões máximas nos nós de junção da rede	217
Quadro V.21: Pressões mínimas nos nós de junção da rede	217
Quadro V.22: Flutuações de pressão nos nós de junção da rede	218
Quadro V.23: Caudais finais e perdas de carga (Ano 0)	218
Quadro V.24: Verificação da velocidade mínima	219
Quadro V.25: Caudais finais e perdas de carga (incêndio no nó I)	220
Quadro V.26: Pressões mínimas nos nós de junção da rede (incêndio no nó I)	220
Quadro VI.1: Valores do módulo de elasticidade de alguns materiais	253
Quadro VI.2: Valores de T_a/T_c para alguns tipos de válvulas	255
Quadro VI.3: Valores dos parâmetros C e K de Mendiluce Rosich	259
Quadro VII.1: Características físicas e geométricas do sistema da figura VII.1	281
Quadro VII.2: Características das condutas do sistema da figura VII.9	289
Quadro VIII.1 – Modelos para o decaimento do cloro na sua forma integrada	297
Quadro IX.1: Valores mínimos de submergência	330
Quadro IX.2 – Tipos de solos e respectivos pesos específicos (γ_s) e ângulos de atrito interno (ϕ)	346
Quadro IX.3 – Ângulo de atrito entre o solo de enchimento da vala e os paramentos da mesma (ϕ')	346
Quadro IX.4: Cargas críticas e áreas de distribuição	355
Quadro X.1 Velocidades médias aproximadas de escoamento superficial (m/s)	368
Quadro X.2: Parâmetros das curvas Intensidade-Duração-Frequência	375
Quadro X.3: Valores de período de retorno, T_R	376
Quadro X.4: Valores médios do coeficiente de escoamento	378
Quadro X.5: Classificação hidrológica de solos segundo o SCS	382
Quadro X.6: Definição das condições antecedentes de humidade	382
Quadro X.7: Condição antecedente de humidade em função da precipitação total nos cinco dias antecedentes	383
Quadro X.8: Número de escoamento CN para regiões urbanas e sub-urbanas	383
Quadro X.9: Valores corrigidos do número de escoamento para AMCI e para AMCIII em função dos valores do número de escoamento para AMCII	384

Quadro AI.1: Valores de k para a fórmula de Colebrook-White	416
Quadro AI.2: Explicações da fórmula de Colebrook-White	417
Quadro AI.3: Valores de C_B e C_K para as fórmulas de Bazin e de Kutter	419
Quadro AI.4: Valores de K_s para a fórmula de Gauckler-Manning-Strickler	420
Quadro AI.5: Valores de C para a fórmula de Hazen-Williams	420
Quadro AI.6: Compilação de valores de K , α e β para a fórmula de Scimemi	421
Quadro AI.7: Valores de K , α e β recomendados para a fórmula de Scimemi	422
Quadro AI.8: Valores de K correspondentes a curvas a 90°	423
Quadro AI.9: Valores de K para válvulas de cunha completamente abertas	424
Quadro AI.10: Valores de K para válvulas de borboleta completamente abertas	425
Quadro AI.11: Valores de K para válvulas cilíndricas em função do ângulo de fecho (θ)	426
Quadro AI.12: Valores de K para válvulas esféricas em função do ângulo de fecho (θ)	426
Quadro AI.13: Valores de K para válvulas de retenção de batente completamente abertas	427
Quadro AII.1: Potências normalizadas de motores eléctricos (kW)	442

NOTA PRÉVIA DA 1ª EDIÇÃO

Elaborar elementos de estudo para os alunos é quase uma tentação de todos aqueles que iniciam a leccionação de uma disciplina. Essa tentação é tão mais acentuada quanto maior é a escassez de textos na língua materna sobre o assunto, mas também quanto menor é a idade do debutante na função docente.

Ora os autores deste texto, em particular o primeiro autor, para sua desventura, já não é propriamente um debutante, e mesmo o segundo autor já trabalha no sector há uma boa dúzia de anos.

Na realidade, o texto que agora se edita teve um pré-início há quase vinte anos quando o primeiro autor, após a conclusão do seu doutoramento, assumiu a responsabilidade da disciplina de Hidráulica Aplicada no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, tendo tido alguns aportes dos diferentes docentes das aulas práticas que ao longo destes quase 20 anos têm colaborado na leccionação da disciplina. Porém, foi decisiva a influência da contribuição do segundo autor nesta última dezena de anos.

Mas, e para não perder o fio à meada, então porquê só agora se edita este texto, já que o ímpeto iniciático já lá vai?

A segunda razão, a carência de textos em português no âmbito do abastecimento de água, embora nos últimos anos tenha vindo a ser um pouco colmatada, nomeadamente com a edição do Manual de Saneamento Básico da Direcção Geral do Ambiente, isto para citar apenas uma obra colectiva, não foi completamente preenchida e, em particular, numa perspectiva que ensaie efectuar uma abordagem académica, a qual, sem ser exaustiva, seja desenvolvida, mas que não perca de vista as aplicações práticas de engenharia.

Assim, e após termos participado na formação de largas centenas de Engenheiros, quer ao nível de bacharelato, licenciatura e mestrado, afigura-se adequada a ocasião para, lembrando a velha máxima do latim “VERBA VOLANT, SCRIPTA MANENT”, passar à forma de livro aquilo que se ia passando como notas soltas.

Claro que é devido um agradecimento para todos, em particular anteriores colaboradores/docentes da área, aqueles que tornaram possível que este texto se tornasse acessível a um público mais amplo.

Um obrigado muito especial ao anterior Director da Imprensa da Universidade de Coimbra, Professor Doutor Fernando Regateiro pela sempre manifestada abertura, pelo apoio e pela amizade, o que faz dele um “velho companheiro” nesta árdua função de publicar em português, ao actual Director da Imprensa, Professor Doutor José de Faria Costa, aos relatores dos

pareceres pelos comentários sempre justos e que contribuíram para uma valorização do texto final, e por último, “the last but not the least”, ao Magnífico Reitor da Universidade de Coimbra, Professor Doutor Fernando Seabra Santos, um colega e amigo há mais de 35 anos, desde o Liceu D. João III, passando pela licenciatura em Engenharia Civil nos conturbados anos de 1974/75 e pela área de Hidráulica e respectivo Laboratório.

Coimbra, Janeiro de 2006

José Alfeu Almeida de Sá Marques
Joaquim José de Oliveira Sousa

NOTA PRÉVIA DA 2ª EDIÇÃO

Proceder a uma edição, revista e ampliada de um qualquer texto científico-técnico-pedagógico, é uma imposição axiomática. Mas, por vezes, mesmo com imposições desta magnitude, a inércia é razão bastante para que tal não se concretize.

No caso presente algumas razões de índole diversa conduziram a que a lei da Física se não impusesse.

Foram fundamentalmente as seguintes:

- a. Razões intrínsecas ao tema “Hidráulica Urbana” que aparecia amputado de uma componente fundamental “Drenagem Urbana”.
- b. O relativo sucesso da 1ª edição e posteriormente da reedição que correspondeu a um número de exemplares da ordem dos 1250 em dois anos (Março de 2006 a Março de 2008).
- c. A difusão do texto a nível nacional.
- d. A implementação do acordo de Bolonha, nomeadamente na Universidade de Coimbra, que alterou significativamente o conteúdo programático de algumas disciplinas.

Como é de boa “norma” todas as críticas são bem-vindas, pois os autores são os primeiros a ter dúvidas quer na extensão, quer no conteúdo, quer na abordagem dos temas tratados.

A todos os colegas, amigos, alunos e instituições que de alguma forma (e foram muitas e variadas) contribuíram para que este texto fosse editado o muito obrigado.

Coimbra, Setembro de 2008

José Alfeu Almeida de Sá Marques
Joaquim José de Oliveira Sousa

xxiii

In Memoriam

LUCÍLIA SÁ MARQUES

NOTA PRÉVIA DA 3ª EDIÇÃO

A presente edição, revista e ampliada, do livro Hidráulica Urbana – Sistemas de Abastecimento de Água e de Drenagem de Águas Residuais, é consequência natural de dois factos:

- o sucesso das edições anteriores que se têm esgotado, de forma sistemática, com mais de 500 exemplares vendidos em cada ano.
- a sensação, corrente em qualquer trabalho científico-técnico-pedagógico, da necessidade de corrigir, modificar, melhorar, ampliar, aprofundar, e “explicar melhor”.

Persiste, no entanto, um princípio e uma preocupação: não tornar este livro tão extenso que se tornasse não “manuseável” no âmbito de uma disciplina.

Fica, no entanto, a insatisfação por se achar que fica incompleto, nomeadamente no dimensionamento optimizado de sistemas, na operação e gestão de sistemas, no número de exemplos de aplicação, no dimensionamento de acessórios, no estudo de sistemas de drenagem tendo em consideração quer a sustentabilidade ambiental e económico-financeira, quer as novas abordagens da drenagem dual. Mas, para tal ser abordado, seria necessário mais do que um volume e essa poderá vir a ser a opção de futuro, isto é, manter uma versão de “estudante” e desenvolver uma edição mais completa e “profissional” em dois volumes.

Repetindo o que escrevemos na 2ª edição, “Como é de boa “norma” todas as críticas são bem-vindas, pois os autores são os primeiros a ter dúvidas quer na extensão, quer no conteúdo, quer na abordagem dos temas tratados”.

A todos os colegas, amigos, alunos e instituições que de alguma forma (e foram muitas e variadas) contribuíram para que este texto fosse editado o muito obrigado.

Coimbra, Setembro de 2011

José Alfeu Almeida de Sá Marques
Joaquim José de Oliveira Sousa

NOMENCLATURA

a	Celeridade ou velocidade de propagação da onda de choque;
a, b	Dimensões da superfície de contacto das rodas do veículo;
a, b, c	Constantes;
a _e	Celeridade equivalente de um sistema com numerosas pequenas modificações nas suas propriedades;
A	Anuidade; área da secção transversal da conduta; caudal médio horário anual;
A, B, C	Constantes que definem a curva característica das bombas;
A _b	Área da base do maciço;
A _e	Área de encosto; área equivalente de um sistema com numerosas pequenas modificações nas suas propriedades;
A _{LL}	Área onde se considera uniformemente distribuída a carga crítica;
ARE	Secção transversal de um reservatório;
A _V	Área de abertura de uma válvula;
B _c	Diâmetro exterior da tubagem;
B _d	Largura da vala ao nível do extradorso da tubagem;
B _{dt}	Largura de transição;
c ₁ , c ₂ , c' ₁ , c' ₂	Constantes que dependem do tipo de material da conduta, da pressão de serviço, do tipo de terreno e do tipo de pavimento;
cos φ	Factor de potência;
C	Capitação; Capacidade necessária de um reservatório (m ³); coeficiente de atrito conduta/solo;
C _a	Consumo médio diário anual;
C _A	Concentração de cloro livre;
C _B	Coefficiente da fórmula de Bazin, concentração da substância que reage com o cloro;
C _{Cl}	Concentração de cloro;
C _{orgC1}	Concentração do composto orgânico C1;
C _{orgC2}	Concentração do composto orgânico C2;
C _d	Consumo do dia de maior consumo; coeficiente de carga;
C _{dβ}	Coefficiente de carga para valas com paramentos inclinados;
C _{energia}	Custo de energia;
C _{exploração}	Custos de exploração;
C _{global}	Custo global;

C_h	Consumo máximo horário;
C_i	Capitação no ano i ; Consumo no nó i ; Caudal externo entrado (alimentação) ou saído (consumo) do nó i ;
C'_i	Capitação temporária no ano i ;
C_{inv}	Custo correspondente a investimento ou custos de primeiro investimento;
C_j	Custo por metro linear da conduta de diâmetro j ;
$C_i(x,t)$	Concentração de uma substância não conservativa na água da conduta i , a uma distância x e no tempo t ;
C_K	Coefficiente da fórmula de Kutter;
C_m	Consumo médio diário do mês de maior consumo;
C_s	Fonte de concentração externa que entra no nó k ;
C_V	Coefficiente de vazão de uma válvula;
Cd_i	Coefficiente de distribuição da conduta i ;
CE	Carga total devida às acções do solo e do tráfego;
CM_i	Constante utilizada no método das características;
CP_i	Constante utilizada no método das características;
d	Difusão molecular da substância não conservativa na água; distância, medida na horizontal, entre a roda do veículo e a tubagem;
D	Diâmetro interior da conduta;
D_e	Diâmetro externo da conduta;
$D_{máx v}$	Diâmetro máximo que cumpre as restrições relativas à velocidade;
$D_{mín v}$	Diâmetro mínimo que cumpre as restrições relativas à velocidade;
D_n	Diâmetro nominal;
D_{vent}	Diâmetro da ventosa;
e	Espessura das paredes de uma conduta;
E	Energia consumida pelo grupo motor/bomba; módulo de elasticidade do material;
E_{mg}	Energia cinética dum corpo girante;
$E(x)$	Erro;
f	Factor de atrito de Darcy-Weisbach; secção transversal da conduta forçada;
$f(x)$	Valor de uma função f no ponto x ;
$f'(x)$	Valor da derivada a função f no ponto x ;
f_a	Factor de actualização de custos;
f_{ak}	Factor de actualização do ano k ao ano 0 ;
f_e	Factor de atrito equivalente de um sistema com numerosas pequenas modificações nas suas propriedades;
f_{pd}	Factor de ponta diário;

f_{ph}	Factor de ponta horário;
f_{pi}	Factor de ponta instantâneo;
f_{pm}	Factor de ponta mensal;
F	Força de deslizamento a suportar por um maciço; número de nós de cota piezométrica fixa; secção transversal da chaminé de equilíbrio;
F_a	Factor de actualização num dado número de anos;
F_h	Componente horizontal da força F ;
F_v	Componente vertical a força F ;
$F[(X_n)]$	Vector dos valores das funções f para $X = X_n$;
g	Aceleração da gravidade;
h	Carga hidráulica em condições estáticas; energia adimensional de uma máquina hidráulica; profundidade;
h_a	Altura geométrica de aspiração;
h_c	Diferença de cotas entre a superfície livre do reservatório de montante e o eixo da bomba
H	Cota piezométrica; pressão mínima; altura medida entre o extradorso da tubagem e a superfície do terreno - recobrimento da tubagem;
$H_{atm.}$	Altura piezométrica atmosférica;
H_{disp}	Carga disponível;
$H_e = H_g + \Delta H$	Altura total de elevação ou altura manométrica; energia que as bombas fornecem ao escoamento;
H_{eej}	Energia fornecida ao sistema pela estação elevatória j incluída na malha;
H_{esl}	Energia fornecida ao sistema pela estação sobrepessora l incluída na malha;
H_f	Perda de carga num troço;
H_g	Altura geométrica de elevação;
H_i	Cota piezométrica no ponto i ;
$H_{i,j}$	Cota piezométrica na conduta i , no ponto j , no instante t ;
$H_{máx.}$	Altura piezométrica máxima;
$H_{mín.}$	Altura piezométrica mínima;
H_R	Altura total de elevação com melhor rendimento;
H_s	Carga que o escoamento necessita para elevar o cauda Q ;
$HP_{i,j}$	Cota piezométrica na conduta i , no ponto j , no instante $t + \Delta t$;
HV	Cota piezométrica a montante de uma válvula redutora de pressão;
$HVRP$	Cota piezométrica a jusante de uma válvula redutora de pressão;

I	Impulso calculado; momento de inércia das massas girantes; intensidade média da corrente eléctrica; inclinação;
I_f	Factor de impacto;
I_k	Conjunto de condutas que levam o fluido para o nó k;
J	Perda de carga unitária;
$J_{i,j}$	Perda de carga unitária no troço i da conduta de diâmetro j;
$J_{máx}$	Perda de carga unitária máxima;
$J(X_n)$	Matriz Jacobiana para $X=X_n$;
$[J(X_n)]^{-1}$	Inversa da matriz Jacobiana para $X = X_n$;
k	Constante; rugosidade absoluta das paredes da conduta; coeficiente de Rankine;
kb	Constante de decaimento do cloro no interior do escoamento;
k_f	Coefficiente de transferência de massa;
k_w	Constante de decaimento na parede;
K	Constante; taxa de crescimento decrescente;
K_1	Coefficiente de redução da tensão de segurança σ_t ;
K_1^{OC}	Factor de ponta mensal de outros consumos;
K_1^{POP}	Factor de ponta mensal da população;
K_2^{OC}	Factor de ponta diário de outros consumos;
K_2^{POP}	Factor de ponta instantâneo da população;
K_3^{OC}	Factor de ponta instantâneo de outros consumos;
K_3^{POP}	Factor de ponta diário da população;
K_a	Factor de assentamento;
K_{ij}	Coefficiente de perda de carga contínua na tubagem que une o nó i ao nó j;
K_{iVRP}	Coefficiente de perda de carga localizada da válvula redutora de pressão i;
K_s	Coefficiente de Manning-Strikler; coeficiente de segurança;
L	Comprimento da conduta; comprimento de A_{LL} , paralelo ao eixo longitudinal da tubagem;
L_e	Comprimento efectivo do apoio da tubagem;
L_{eq}	Comprimento equivalente;
L_i	Comprimento da conduta i;
$L_{i,j}$	Comprimento de conduta de diâmetro j no troço i;
L_v	Largura da vala;
$m_i^{n_i}$	Massa já sujeita a reacção correspondente ao passo 1 do último volume elementar da conduta i;

M	Número de malhas elementares naturais de um sistema de distribuição;
$M_{Nó j}$	Massa que entra no nó j durante o intervalo de tempo Δt ;
n	Diferença entre o ano i e o ano 0; número de anos a que se refere o estudo (período de vida útil da obra); expoente da equação da perda de carga contínua; número de pisos acima do solo; velocidade de rotação de uma máquina hidráulica; índice de vazios do solo;
n_0	Velocidade nominal de rotação;
n_{bak}	Número de horas de bombeamento no ano k;
n_d	Número de diâmetros comerciais a considerar no estudo;
n_t	Número de troços em que se divide a adutora;
nb	Número de horas diárias da adução por bombeamento;
ne	Número de estações elevatórias incluídas na malha;
ng	Número de horas diárias da adução gravítica;
nm	Número de malhas;
ns	Número de estações sobreprensoras incluídas na malha;
nt	Número de troços confluentes no nó i;
ntm	Número de troços pertencentes à malha;
N	Número de nós de junção de um sistema de distribuição; velocidade de rotação de uma máquina hidráulica em rotações por minuto; número de fases; velocidade de rotação de uma máquina hidráulica;
N_i	Número de troços da conduta i;
N_R	Velocidade de rotação, para o melhor rendimento, de uma máquina hidráulica;
NHAG	Número de horas de adução gravítica;
NHB ₂₀	Número de horas de bombeamento diárias nos primeiros 20 anos;
NHB ₄₀	Número de horas de bombeamento diárias nos segundos 20 anos;
NHB _D	Número médio de horas de bombeamento por dia;
NPSH _{disp}	NPSH disponível;
NPSH _{exig}	NPSH exigido;
NS(i)	Número de secções da conduta i;
p	Custo médio da energia eléctrica consumida; preço médio do kWh; pressão ou altura piezométrica; pressão de ensaio da conduta instalada na vala; pressão interior; pressão num dado ponto e instante;
p_{atm}	Pressão atmosférica;
p_e	Pressão absoluta à entrada da bomba;

$P_{m\acute{a}x}$	Pressão máxíma;
$P_{m\acute{a}x\ k}$	Pressão máxíma no nó k;
P	Peso da tubagem cheia de água, correspondente ao comprimento entre dois maciços consecutivos; potência; população; peso do solo; carga transmitida por cada roda do veículo;
P_0	Pressão, em valor absoluto, em regime permanente;
P_a	Pressão em valor absoluto;
$P_{a\ m\acute{a}x}$	Pressão absoluta de paragem da bomba; pressão absoluta máxíma permitida;
$P_{a\ min}$	Pressão absoluta de arranque da bomba; pressão absoluta mínima permitida;
P_B	Potência consumida pela bomba;
P_{cr}	Carga crítica aplicada à superfície;
P_E	Potência eléctrica do motor;
P_H	Potência hidráulica;
P_i	População no ano i;
P_{SAT}	Valor máxímo da população (método do crescimento retardado);
P_0, P_f	Populações no início e no final do período, respectivamente;
$P_{m\acute{í}n_k}$	Pressão mínima no nó k;
P_n	Pressão nominal;
q_u	Caudal unitário de percurso;
Q	Caudal; carga transmitida por cada eixo do veículo;
Q_1	Caudal da adução por bombeamento;
Q_2	Caudal da adução gravítica;
Q_{ag}	Caudal de dimensionamento da adutora gravítica;
Q_c	Caudal concentrado;
$Q_{dim\ k}$	Caudal de dimensionamento no ano k;
Q_e	Caudal elevado pelos grupos bomba/motor;
Q_{eq}	Caudal equivalente;
Q_{ETA}	Caudal de dimensionamento da ETA;
$Q_{i,j}$	Caudal na conduta i, no ponto j, no instante t;
Q_{ij}	Caudal que circula no troço que liga o nó i ao nó j;
Q_j	Caudal de jusante;
Q_m	Caudal de montante;
Q_{md}	Caudal médio diário;
$Q_{m.h.a.}$	Caudal médio horário anual;
Q_{pd}	Caudal de ponta diário;
Q_{perc}	Caudal de percurso;
Q_{ph}	Caudal de ponta horário;

Q_{pi}	Caudal de ponta instantâneo ou horário;
Q_{pm}	Caudal de ponta mensal;
Q_r	Caudal solicitado pela rede;
Q_R	Caudal elevado com o melhor rendimento;
QA	Caudal no ponto A, no instante t;
QB	Caudal no ponto B, no instante t;
QP_{ij}	Caudal na conduta i, no ponto j e no instante $t+\Delta t$;
r^2	Coefficiente de determinação;
R	Raio hidráulico; distância entre a roda do veículo e a tubagem;
R_e	Número de Reynolds;
R_L	Carga de rotura à compressão diametral, no laboratório;
RE	Capacidade de resistência ao esmagamento da tubagem instalada;
S	Secção transversal definida nos desenhos;
S_k	Conjunto de troços que definem a adutora entre a secção de montante e o nó k;
S_L	Menor valor entre o diâmetro exterior da tubagem e o comprimento de A_{LL} perpendicular ao eixo longitudinal da tubagem;
Sc	Número de Schmidt;
Sh	Número de Sherwood;
SDR	Quociente entre o diâmetro nominal e a espessura;
t	Taxa de juro anual;
t_0, t_f	Anos extremos do período;
t_e	Tempo de duração do bombeamento; tempo de enchimento;
t_v	Tempo de esvaziamento; tensão de saturação de vapor do líquido escoado;
T_f	Tempo de fase;
T	Número de troços de um sistema de distribuição; temperatura; período da oscilação em massa na chaminé de equilíbrio;
T_a	Taxa de crescimento aritmético da população; tempo de anulação do escoamento;
T_c	Tempo de manobra da válvula;
T_g	Taxa de crescimento geométrico da população;
T_r	Binário de uma máquina hidráulica;
T_{rR}	Binário, com melhor rendimento, de uma máquina hidráulica;
U_e	Velocidade média do escoamento à entrada da bomba;
Ui	Velocidade média da água na conduta i;

V	Tensão da corrente eléctrica; velocidade; volume; volume de betão do maciço; volume do reservatório de ar comprimido;
v	velocidade da água na conduta;
V_a	Valor actual do capital; volume ocupado pelo ar;
V_{avaria}	Volume de avaria;
V_f	Valor futuro do capital;
V_i	Volume total da conduta (comprimento da conduta multiplicado pela área da secção transversal);
$V_{incêndio}$	Volume de incêndio;
$V_{máx}$	Velocidade máxima; volume máximo;
$V_{mín}$	Velocidade mínima; volume mínimo;
V_r	Volume residual;
$V_{reg.}$	Volume de regularização;
$V_{reg. c/ avaria}$	Volume de regularização com avaria;
V_t	Volume total do reservatório; volume total;
V_u	Volume útil de água no reservatório;
VOC_i	Volume médio de outros consumos no ano i;
VP_i	Volume diário de perdas no ano i;
V_0	Velocidade inicial na conduta com chaminé de equilíbrio;
W_L	Força aplicada sobre a tubagem;
W_S	Carga exercida pelo solo, por unidade de comprimento de tubagem;
W_T	Força devida ao tráfego aplicada por unidade de comprimento de tubagem;
X_n, X_{n+1}	Vectores das incógnitas nas iterações de ordem (n) e (n+1), respectivamente;
Z	Número de arranques da bomba; amplitude da oscilação em massa na chaminé de equilíbrio;
Z^*	Amplitude máxima da oscilação em massa na chaminé de equilíbrio;
Z_k	Cota topográfica do nó k;
$Z_{máx}$	Número máximo de arranques por hora;
Z_v	Cota topográfica da válvula;
α	Velocidade de rotação adimensional de uma máquina hidráulica; coeficiente de Coriolis; ângulo que a conduta faz com a horizontal;
α, α'	Constantes função do tipo de material da conduta e respectiva pressão de serviço;

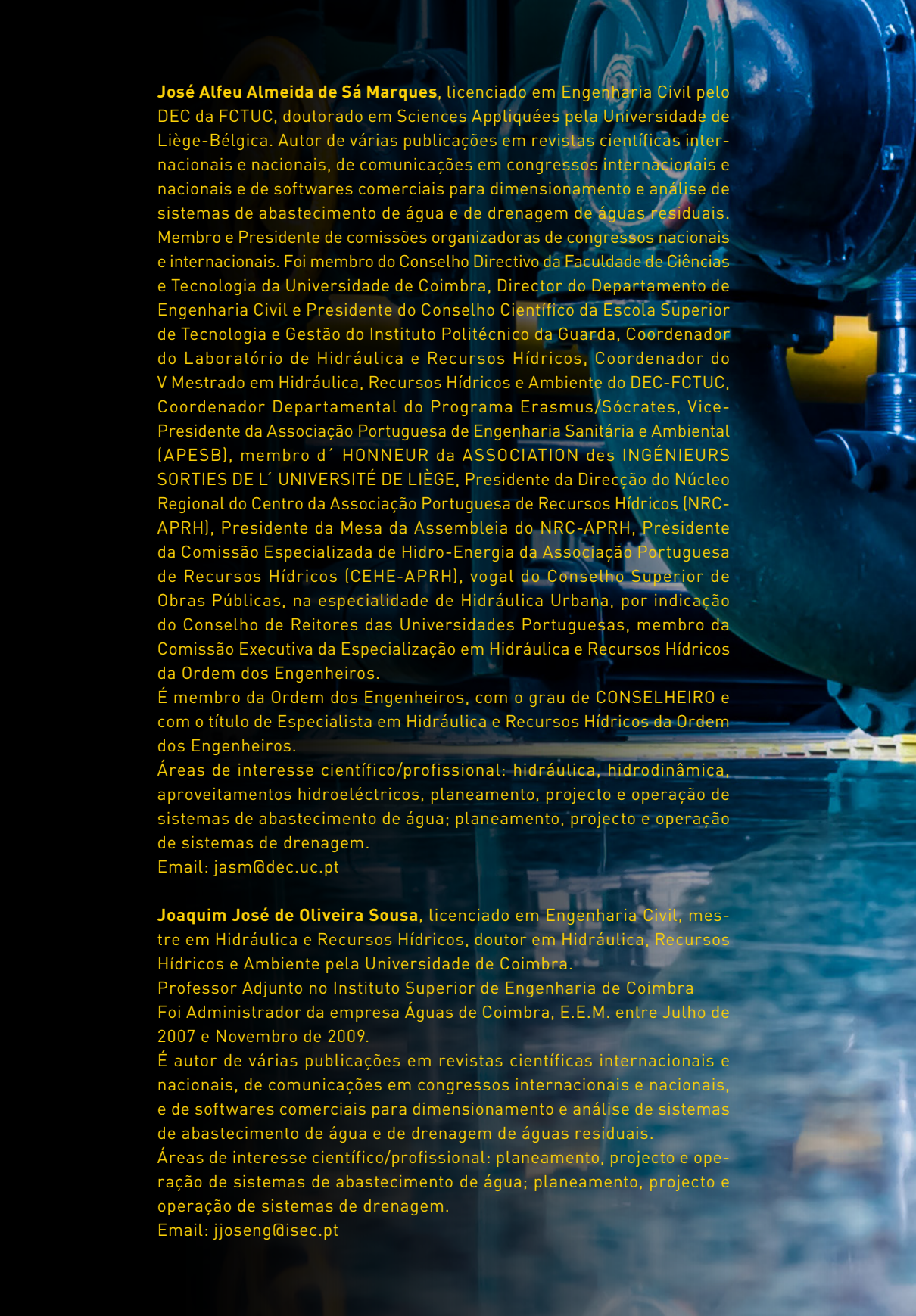
β	Coefficiente de Boussinesq; constante da fórmula de Darcy-Weisbach; Tr/TR - binário adimensional de uma máquina hidráulica;
γ	Peso volúmico;
γ_B	Peso volúmico do betão;
γ_d	Peso específico do solo seco;
γ_s	Peso específico do solo; peso específico do solo saturado;
γ_w	Peso específico da água;
ΔH_{cont}^a	Perda de carga contínua na conduta de aspiração;
ΔH_{loc}^a	Perda de carga localizada na conduta de aspiração;
ΔH_c	Perda de carga contínua;
ΔH_{cont}^c	Perda de carga contínua na conduta de compressão;
ΔH_{loc}^c	Perda de carga localizada na conduta de compressão;
ΔH_i	Perda de carga no troço i ;
ΔH_{ij}	Perda de carga total (contínua e localizada) na tubagem que une o nó i ao nó j ;
ΔH_L	Perda de carga localizada;
$\Delta H_{m\acute{a}x}$	Perda de carga máxima;
Δp	Varição de pressão;
ΔQ_m	Correcção de caudal de uma malha elementar da rede, em que o índice m identifica a malha considerada;
Δt	Intervalo de tempo;
ΔV	Varição de volume de gás; variação de velocidade;
ΔZ	Diferença entre as cotas piezométricas dos dois nós de cota piezométrica fixa que definem a malha imaginária (ou fictícia);
ε	Constante; módulo de elasticidade volumétrica do líquido;
η	Rendimento global do grupo motor-bomba;
η_{bomba}	Rendimento da bomba;
λ	Multiplicador para o método das características;
μ	Coefficiente de atrito interno do solo de enchimento da vala;
μ'	Coefficiente de atrito entre o solo de enchimento da vala e o solo natural;
μ_B	Coefficiente de atrito betão/solo;
ν	Viscosidade cinemática;
ξ_i	Varição máxima permitida para a celeridade de cada conduta;
ρ	Massa específica ou massa volúmica;

σ	Tensão a que está a trabalhar o material; tensão aplicada no solo;
σ_t	Tensão de segurança do terreno sob a acção de cargas verticais;
σ_v	Tensão vertical;
τ	Abertura relativa da válvula (adimensionalizada); tensão média de arrastamento;
ϕ	Ângulo de atrito interno do solo de enchimento da vala;
ϕ'	Ângulo de atrito entre o solo de enchimento da vala e o solo natural;
$\phi(D)$	Custo do metro linear da conduta de diâmetro D;
$\phi(Q)$	Função que exprime as perdas de carga, contínuas e localizadas;
Ψ	Parâmetro adimensional que depende da deformação da conduta, do tipo de constrangimento axial e das características do meio envolvente;
ω	Velocidade angular de rotação;
∇	Volume;
ϑ	Caudal adimensional de uma máquina hidráulica.

ACRÓNIMOS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
BDC	Bomba Doseadora de Cloro;
CP	Cota Piezométrica;
DM	<i>Dinamic Method</i> ;
DN	Diâmetro Nominal;
DVM	<i>Discrete Volume Method</i> ;
EDM	<i>Event Driven Method</i> ;
ETA	Estação de Tratamento de Água;
ETAR	Estação de Tratamento de Águas Residuais;
FDM	<i>Finite Difference Method</i> ;
GE	Grupo Electro-bomba;
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil;
LP	Linha Piezométrica;
M	Manómetro;
MC	Medidor de Caudal;
NPSH	<i>Net Positive Suction Head</i> ;
phr	Plano horizontal de referência;
PDR	Plano de Desenvolvimento Regional;
PEAD	Polietileno de Alta Densidade

PVC	Policloreto de Vinilo
RAC	Reservatório de Ar Comprimido;
RGSPDADAR	Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais;
TDM	<i>Time Driven Method;</i>
VD	Válvula de Descarga;
VS	Válvula de Seccionamento.



José Alfeu Almeida de Sá Marques, licenciado em Engenharia Civil pelo DEC da FCTUC, doutorado em Sciences Appliquées pela Universidade de Liège-Bélgica. Autor de várias publicações em revistas científicas internacionais e nacionais, de comunicações em congressos internacionais e nacionais e de softwares comerciais para dimensionamento e análise de sistemas de abastecimento de água e de drenagem de águas residuais. Membro e Presidente de comissões organizadoras de congressos nacionais e internacionais. Foi membro do Conselho Directivo da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Director do Departamento de Engenharia Civil e Presidente do Conselho Científico da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico da Guarda, Coordenador do Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos, Coordenador do V Mestrado em Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente do DEC-FCTUC, Coordenador Departamental do Programa Erasmus/Sócrates, Vice-Presidente da Associação Portuguesa de Engenharia Sanitária e Ambiental (APESB), membro d' HONNEUR da ASSOCIATION des INGÉNIEURS SORTIES DE L' UNIVERSITÉ DE LIÈGE, Presidente da Direcção do Núcleo Regional do Centro da Associação Portuguesa de Recursos Hídricos (NRC-APRH), Presidente da Mesa da Assembleia do NRC-APRH, Presidente da Comissão Especializada de Hidro-Energia da Associação Portuguesa de Recursos Hídricos (CEHE-APRH), vogal do Conselho Superior de Obras Públicas, na especialidade de Hidráulica Urbana, por indicação do Conselho de Reitores das Universidades Portuguesas, membro da Comissão Executiva da Especialização em Hidráulica e Recursos Hídricos da Ordem dos Engenheiros.

É membro da Ordem dos Engenheiros, com o grau de CONSELHEIRO e com o título de Especialista em Hidráulica e Recursos Hídricos da Ordem dos Engenheiros.

Áreas de interesse científico/profissional: hidráulica, hidrodinâmica, aproveitamentos hidroeléctricos, planeamento, projecto e operação de sistemas de abastecimento de água; planeamento, projecto e operação de sistemas de drenagem.

Email: jasm@dec.uc.pt

Joaquim José de Oliveira Sousa, licenciado em Engenharia Civil, mestre em Hidráulica e Recursos Hídricos, doutor em Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente pela Universidade de Coimbra.

Professor Adjunto no Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Foi Administrador da empresa Águas de Coimbra, E.E.M. entre Julho de 2007 e Novembro de 2009.

É autor de várias publicações em revistas científicas internacionais e nacionais, de comunicações em congressos internacionais e nacionais, e de softwares comerciais para dimensionamento e análise de sistemas de abastecimento de água e de drenagem de águas residuais.

Áreas de interesse científico/profissional: planeamento, projecto e operação de sistemas de abastecimento de água; planeamento, projecto e operação de sistemas de drenagem.

Email: jjoseng@isec.pt



SÉRIE ENSINO
IMPRESA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA
COIMBRA UNIVERSITY PRESS
2018

UNIVERSIDADE D
COIMBRA



I
IMPRESA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA
COIMBRA UNIVERSITY PRESS

