



Águas Subterrâneas





Águas Subterrâneas

Charles R. Fitts

tradução da
2ª edição

Revisão técnica
Marcelo Ribeiro Barison



Dedicado a Claire, nossos filhos Liam, John, Henry, Thomas
e Dennis, e nossos pais Nancy, Dick, Peg e Edição.

Prefácio

Prefácio à primeira edição

Este livro serve como um livro-texto principal para um primeiro curso de princípios em águas subterrâneas, normalmente oferecido para estudantes dentro dos departamentos de geociência, ciências ambientais, engenharia geológica e engenharia civil. Este volume conciso também pode servir como um texto de referência para os profissionais.

Águas Subterrâneas começa com uma visão geral de papel da água subterrânea no ciclo hidrológico e no abastecimento de água, contaminação e aspectos de construção. Os capítulos subsequentes introduzem os princípios físicos: propriedades dos materiais de subsolo, fluxo de águas subterrâneas, geologia de águas subterrâneas, deformação e técnicas de modelagem de fluxo. Os últimos capítulos abordam a química e a contaminação de águas subterrâneas. Este tratamento do tema é intencionalmente interdisciplinar, tecendo teorias importantes e métodos das disciplinas de física, química, matemática, geologia, biologia e ciências ambientais.

Escrevi este livro porque queria ensinar conceitos e análises quantitativas com um livro claro, leve, mas completo. Com esses objetivos em mente, empreguei figuras atraentes e linguagem simples por toda a parte. Houve o cuidado de incorporar cobertura atualizada e referências para os avanços rápidos em técnicas de modelagem, processos de transporte, e tecnologias de reparo.

A solução de problemas do mundo real é envolvente e promove o pensamento crítico. Para este fim, há exemplos espalhados por todo o texto, com uma seleção de problemas ao final de cada capítulo. As respostas para os problemas são detalhadas em um apêndice. O instrutor que adotar este texto receberá um manual completo de soluções, mediante solicitação.

Prefácio à Segunda Edição

A segunda edição tem uma melhoria significativa sobre a primeira. Como era de esperar, muitos erros foram percebidos e corrigidos. Sou grato aos alunos e professores observadores, que me alertaram para muitos deles.

Incluímos conteúdo novo e atualizado em muitos lugares. A seção sobre projeto e construção de poços foi ampliada e atualizada. Há uma nova seção sobre a hidrologia de águas superficiais e interação de águas subterrâneas/águas superficiais. A seção em testes de caracol foi completamente substituída, um novo método de análise de testes de bombeamento foi adicionado e uma solução transiente para modelagem de águas subterrâneas foi adicionada. O capítulo de modelagem de fluxo de águas subterrâneas foi atualizado consideravelmente, com novos exemplos e cobertura da complexidade mais detalhada, estimativa de parâmetros, calibragem e incerteza. Há um novo capítulo sobre o fluxo de calor com introduções à interpretação de perfis de temperatura, sistemas de bomba de calor e energia geotérmica.

O site Web para a segunda edição fornece acesso a novos vídeos e animações, mais suplementos de lição de casa, alguns relatórios de USGS, e software livre que está integrado aos exemplos e lições de casa. Para os testes de caracol e testes de bombeamento, as novas planilhas oferecem ferramentas eficientes para a curva de combinação e análise de teste. Estas planilhas modernizam a cobertura de testes de caracol e de testes de bombeamento, indo além da ultrapassada combinação de curvas em papel. Outras planilhas são fornecidas para simular um fluxo de calor unidimensional estável e transiente. O software AnAqSimEDU (Analytic Aquifer Simulator, versão educacional) é fornecido para a modelagem de fluxo aquífero estável e redes de fluxos. AnAqSimEDU é útil para explorar a modelagem de uma forma simples, enquanto se aprende sobre as condições de contorno, anisotropia e heterogeneidade. Espero que os instrutores utilizem essa ferramenta de software como base para exercícios de laboratório de informática.

A segunda edição possui listas de palavras-chave no início de cada capítulo e mais problemas na lição de casa ao final de cada capítulo. Muitos dos novos problemas são mais conceituais que quantitativos. Vários instrutores fora dos EUA solicitaram unidades no sistema internacional de medidas; agora todos os exemplos e os problemas que utilizam unidades inglesas também têm unidades do SI entre parênteses.

Agradecimentos

Sou grato pela oportunidade de realizar este projeto, uma oportunidade oferecida pela graça de Deus, a liberdade da carreira acadêmica e o apoio contínuo de minha família. A University of Southern Maine generosamente concedeu uma licença de um ano para cada edição. Essas licenças sabáticas permitiram grandes blocos de tempo para pesquisa/escrita, que acredito que foram fundamentais para um resultado coerente. Recebi um excelente apoio editorial de Frank Cynar, Simon Crump, Jeniffer Hele, John Fedor, Jeff Freeland e Kathy Morrissey, na Academic Press. Sou grato pela atenção dada por doze revisores externos, anônimos para mim, que se debruçaram sobre os primeiros capítulos. Alguns deles foram muito além da chamada do dever, oferecendo sugestões importantes que melhoraram a organização do livro. Gostaria, também, de agradecer aos muitos estudantes que ajudaram a testar os primeiros rascunhos do livro, e estudantes e professores que comentaram sobre a primeira edição. Agradeço pelo seu retorno por favor, me escreva algumas linhas.

Charles R. Fitts
Scarborough, Maine
Fevereiro de 2012

Sumário

PREFÁCIO	vii
CAPÍTULO 1	Águas Subterrâneas: O Quadro Geral	1
1.1	Introdução	1
1.2	Reservatórios e Fluxos Globais de Água	4
1.3	Terminologia para Águas Abaixo da Superfície	6
1.4	Fluxos Afetando Águas Subterrâneas	7
1.4.1	Infiltração e Recarga	8
1.4.2	Evapotranspiração	9
1.4.3	Descarga de Água Subterrânea para Aquíferos na Superfície	11
1.4.4	Bombeamento	11
1.5	Equilíbrio Hidrológico	12
1.6	Uso de Água e Água Subterrânea	14
1.7	O que os Cientistas de Águas Subterrâneas Fazem	16
1.8	Problemas	17
CAPÍTULO 2	Propriedades Físicas	21
2.1	Introdução	21
2.2	Propriedades da Água	21
2.2.1	Densidade e Compressibilidade	22
2.2.2	Viscosidade	23
2.2.3	Tensão Superficial e Capilaridade	24
2.3	Propriedades do Ar	25
2.4	Propriedades dos Meios Porosos	26
2.4.1	Porosidade	26
2.4.2	Tamanho do Grão	29
2.4.3	Conteúdo Volumétrico de Água e Densidade Bruta	30
2.5	Energia e Coluna Hidrostática	32
2.5.1	Hidrostática	34
2.6	Medindo a Coluna Hidrostática com Poços e Piezômetros	35
2.7	Problemas	38

CAPÍTULO 3	Princípios de Fluxo.....	41
3.1	Introdução	41
3.2	Lei de Darcy e Condutividade Hidráulica.....	42
3.2.1	Descarga Específica e Velocidade Linear Média	44
3.2.2	Lei de Darcy em Três Dimensões.....	45
3.3	Permeabilidade e Condutividade Intrínseca de Outros Fluidos.....	48
3.4	Limites na Aplicação da Lei de Darcy.....	49
3.4.1	A Suposição de Continuidade	49
3.4.2	Fluxo Laminar e Turbulento	50
3.5	Heterogeneidade e Anisotropia da Condutividade Hidráulica	52
3.6	Estimando Condutividades Hidráulicas Médias	55
3.7	Transmissividade	58
3.8	Medindo a Condutividade Hidráulica	59
3.8.1	Correlações entre Tamanho de Grão e Condutividade Hidráulica	59
3.8.2	Testes de Condutividade Hidráulica em Laboratório	60
3.8.3	Slug Teste e Ensaio de Bombeamento	63
3.8.4	Testes de Rastreadores	63
3.8.5	Modelos de Sistemas Naturais.....	65
3.9	Fluxo na Rocha Fraturada	65
3.10	Fluxo em Meio Insaturado.....	67
3.10.1	Conteúdo e Pressão D'água	67
3.10.2	Medindo Pressões Abaixo da Atmosférica	70
3.10.3	Conteúdo de Água, Condutividade Hidráulica e Lei de Darcy	71
3.11	Fluxo de Água Subterrânea com Densidade Variável.....	72
3.11.1	Interfaces de Água Potável-Salgada em Aquíferos Costeiros.....	73
3.12	Problemas.....	78
CAPÍTULO 4	Exploração em Campo e Poços	85
4.1	Introdução	85
4.2	Explorando Abaixo da Superfície	85
4.2.1	Perfuração	86
4.2.2	Sondas "Direct-Push"	86
4.2.3	Poços Jateados	88
4.2.4	Perfuração	89
4.2.5	Resistividade, Eletromagnetismo e Levantamentos por Radar.....	92
4.2.6	Levantamentos por Refração Sísmica	95
4.2.7	Registro de Furo de Sondagem	96
4.3	Poços	98
4.3.1	Construção de Poços	98
4.3.2	Poços Coletores Horizontais.....	101

	4.3.3	Beneficiamento, Telas e Filtros de Cascalho	102
	4.3.4	Obturadores e Revestimentos	104
	4.4	Problemas	106
CAPÍTULO 5		Hidrologia e Geologia	109
	5.1	Padrões Gerais do Fluxo de Águas Subterrâneas	110
	5.1.1	Aquíferos e Camadas de Confinamento	110
	5.1.2	Recarga e Descarga.....	111
	5.1.3	Mapas da Superfície do Lençol Freático e da Superfície Potenciométrica.....	114
	5.1.4	Fluxo de Fluidos Porosos em Escala de Crosta	115
	5.2	Hidrologia de Águas Superficiais e Interação entre Águas Subterrâneas e Superficiais	117
	5.2.1	Medindo e Estimando a Descarga do Curso D'água.....	117
	5.2.2	Hidrograma do Curso, Fluxo de Base e Fluxo Rápido.....	122
	5.2.3	Descargas entre Águas Subterrâneas e Águas Superficiais	125
	5.2.4	Inundação do Curso.....	128
	5.2.5	Variações Espaciais e Temporais na Recarga.....	132
	5.2.6	Estimando Taxas de Recarga	133
	5.3	Águas Subterrâneas em Materiais Inconsolidados	137
	5.3.1	O Aquífero High Plains.....	140
	5.3.2	Planície Costeira de Nova Jersey.....	144
	5.3.3	Depósitos Glaciais a Oeste de Cape Cod	146
	5.4	Águas Subterrâneas em Rochas Sedimentares	149
	5.4.1	O Aquífero de Arenito em Dakota	151
	5.4.2	Formações Calcárias em Mammoth Cave, Kentucky.....	153
	5.5	Águas Subterrâneas em Rochas Ígneas e Metamórficas.....	155
	5.5.1	Basaltos do Platô de Columbia, Noroeste dos Estados Unidos	157
	5.6	Solo Congelado e Subsolo Permanentemente Congelado.....	160
	5.7	Problemas	162
CAPÍTULO 6		Equações de Deformação, Armazenamento e Fluxo Geral	165
	6.1	Introdução	165
	6.2	Tensão Efetiva	166
	6.3	Flutuações da Pressão Atmosférica	168
	6.4	Instabilidade de Escavação e Liquefação.....	170
	6.5	Instabilidade da Encosta	171
	6.5.1	Deslizamento do Reservatório da Represa Vaiont, Itália.....	173
	6.6	Sismos Induzidos e Pressões de Águas Subterrâneas	174
	6.7	Compressão de Matriz	177

6.7.1	Afundamento no Vale de San Joaquin	181
6.7.2	Consolidação: Compressão Dependente do Tempo	185
6.7.3	Pressões de Água Porosa em Bacias Sedimentares.....	188
6.8	Mudanças no Armazenamento de Água no Subsolo	190
6.8.1	Armazenamento Elástico	190
6.8.2	Armazenamento Freático	192
6.8.3	Armazenamento em Aquíferos com Interfaces de Água Potável-Salgada	195
6.9	Equações Gerais de Fluxo.....	196
6.9.1	Fluxo Saturado Tridimensional	197
6.9.2	Fluxo em Meio Saturado Bidimensional em Aquíferos.....	200
6.9.3	Fluxo em Meio Insaturado Tridimensional	204
6.10	Visão Geral da Modelagem Matemática de Fluxo.....	205
6.11	Problemas.....	207

CAPÍTULO 7 Modelagem do Fluxo Utilizando Métodos Básicos.....213

7.1	Introdução	213
7.2	Aquíferos com Transmissividade Uniforme	214
7.2.1	Solução para Fluxo Uniforme.....	214
7.2.2	Solução para o Fluxo Radial a um Poço.....	216
7.2.3	Solução para Recarga/Vazamento Uniforme	219
7.2.4	Estimando a Razão Recarga/Transmissividade ...	223
7.2.5	Superposição.....	224
7.2.6	Zona de Influência de um Poço em Fluxo Laminar	225
7.2.7	Poços Perto de Limites Fixos de Coluna Constante.....	229
7.2.8	Poços Perto de Limites Fixos Impermeáveis	233
7.2.9	Poços Perto de Limites Circulares de Coluna Constante.....	236
7.2.10	Analisando o Rebaixamento de Poços a Longo Prazo	239
7.3	Fluxo no Plano Vertical	240
7.4	Soluções Gráficas de Rede de Fluxo.....	242
7.4.1	Condições de Limite.....	243
7.4.2	Descargas.....	244
7.4.3	Como Desenhar Redes de Fluxo.....	245
7.4.4	Sistemas Anisotrópicos	246
7.4.5	Decidindo Sobre o Uso de um Modelo Uni, Bi ou Tridimensional.....	250
7.5	Aquíferos Livres com uma Base Horizontal.....	251
7.5.1	Soluções para Fluxo Uniforme, Fluxo Radial e Recarga Uniforme	252
7.5.2	Superposição e Imagem	255
7.6	Problemas	257

CAPÍTULO 8	Modelagem Hidráulica de Poço Transiente e Elevação do Nível d'Água.....	265
8.1	Introdução	265
8.2	Teste Slug ou Ensaio de Perda d'Água sob Pressão.....	266
8.2.1	Método de Cooper <i>et al.</i> para Poços com Seção Filtrante Abaixo do Lençol Freático	268
8.2.2	Método de Dagan para Poços Vazados no Lençol Freático	271
8.2.3	Outros Métodos e Circunstâncias Menos Comuns	274
8.2.4	Problemas e Diretrizes para Testes Slug	275
8.3	Resposta Transiente de Aquíferos para Bombeamento.....	277
8.3.1	Solução de Theis para um Aquífero Não Vazado.....	277
8.3.2	Solução de Hantush-Jacob para um Aquífero Vazado Sem Armazenamento no Aquitardo.....	282
8.3.3	A solução de Hantush para um Aquífero Vazado com Armazenamento no Aquitardo.....	283
8.3.4	A solução de Neuman para um Aquífero Não Confinado.....	285
8.4	Análise do Teste de Bombeamento	287
8.4.1	Combinação de Curva Log-Log	288
8.4.2	Gráficos Semilog de Rebaixamento <i>Versus</i> Tempo	292
8.4.3	Análise de de Rebaixamento Pseudoestável <i>Versus</i> Distância	295
8.4.4	Teste de Descarga Variável com Rebaixamento Constante	295
8.5	Considerações Adicionais para Testes de Bombeamento	296
8.5.1	Superposição no Espaço — Múltiplos Poços e Limites de Aquífero	297
8.5.2	Superposição nas Taxas de Bombeamento Variáveis com o Tempo em um Poço	299
8.5.3	Penetração Parcial e Hidráulica Perto do Poço de Bombeamento.....	301
8.6	Elevação Transiente sob uma Área de Recarga Retangular.....	303
8.7	Problemas	306
CAPÍTULO 9	Modelagem de Fluxo Auxiliada por Computador.....	313
9.1	Introdução	313
9.2	Método de Diferença Finita	314
9.2.1	Equações de Diferença Finita.....	316
9.2.2	Condições de Limite.....	321
9.2.3	Modelo de Exemplo	322
9.3	Método de Elemento Finito.....	326
9.3.1	Equações de Elemento Finito	330
9.3.2	Condições de Limite.....	333

9.4	Método de Elemento Analítico.....	333
9.4.1	Equações para Fluxo de Aquífero Bidimensional	334
9.4.2	Elementos Comuns	340
9.4.3	Modelo de Exemplo	345
9.5	Pontos Fortes e Limitações dos Métodos	346
9.6	Processo de Modelagem.....	349
9.6.1	Modelos Conceituais, Parâmetros e Complexidade.....	350
9.6.2	Calibragem do Modelo e Estimativa de Parâmetro.....	353
9.6.3	Resultados, Previsões e Incerteza do Modelo	355
9.7	Problemas	358
CAPÍTULO 10		
	Química das Águas Subterrâneas	363
10.1	Introdução.....	363
10.2	Propriedades Moleculares da Água.....	364
10.3	Unidades de Concentração de Solute	366
10.4	Solutos Naturais.....	368
10.4.1	Solutos Inorgânicos	368
10.4.2	Eletronutralidade	372
10.4.3	Representações Gráficas de Resultados Químicos Inorgânicos.....	373
10.4.4	Solutos Orgânicos.....	375
10.5	Reações Químicas	376
10.5.1	Equilíbrio	377
10.5.2	Atividade e Concentração Efetiva	379
10.5.3	Taxas de Reação e Desvio do Equilíbrio	382
10.6	Dissolução Mineral e Precipitação.....	383
10.7	Fracionamento Gás-Água	385
10.8	Reações da Fase Aquosa.....	388
10.8.1	pH, Ácidos e Bases	388
10.8.2	Reações do Carbonato e Alcalinidade	390
10.8.3	Complexos Metálicos	392
10.8.4	Oxidação e Redução	395
10.8.5	Reações Redox Biogeoquímicas	399
10.9	Sorção.....	401
10.9.1	Complexação de Íons na Superfície	401
10.9.2	Compostos Orgânicos Não Polares.....	405
10.10	Isótopos	409
10.10.1	Isótopos Estáveis e Origens de Água.....	410
10.10.2	Datação Radioisotópica e Idade dos Materiais	411
10.10.3	Registros de Águas Subterrâneas do Paleoclima.....	415
10.11	Exemplos de Processos Químicos Naturais das Águas Subterrâneas.....	417
10.11.1	Aquífero da Flórida: Escala Regional	417

	10.11.2	Aquífero da Flórida: Escala Local	419
	10.11.3	Aquífero do Rio Milk	421
	10.12	Problemas	424
CAPÍTULO 11		Contaminação de Águas Subterrâneas	429
	11.1	Introdução	429
	11.2	Fontes de Contaminação	430
	11.2.1	Tanques de Armazenamento Vazados	431
	11.2.2	Sistemas Sépticos	431
	11.2.3	Aterros	432
	11.2.4	Outros	433
	11.3	Contaminantes Orgânicos	435
	11.3.1	Visão Geral dos Padrões de Migração	435
	11.3.2	Estrutura e Ocorrência de Contaminantes Comuns	437
	11.3.3	Propriedades de Contaminantes Comuns	441
	11.4	Fase Líquida Não Aquosa	445
	11.4.1	Saturação e Fluidos Úmidos e Não Úmidos	445
	11.4.2	Tensão Interfacial e Pressão Capilar	446
	11.4.3	Pressão Capilar <i>versus</i> Saturação e Saturação Residual	449
	11.4.4	Permeabilidade Relativa e Fluxo de Múltiplas Fases	452
	11.5	Processos de Transporte de Solute	453
	11.5.1	Advecção e Dispersão Mecânica	453
	11.5.2	Difusão Molecular	455
	11.5.3	Sorção	458
	11.5.4	Transporte de Coloides	460
	11.6	Estudos de Caso de Transporte de Solute	462
	11.6.1	Teste de Rastreador de CFB Borden, Ontário	462
	11.6.2	Derramamento de Gasolina e Diesel na Carolina do Norte	466
	11.7	Modelagem de Transporte de Solute	470
	11.7.1	Modelagem de Dispersão e Difusão	470
	11.7.2	Equações Gerais para Solutos Não Reativos	474
	11.7.3	Equações Gerais para Solutos Reativos	476
	11.7.4	Condições de Limite	477
	11.7.5	Solução Unidimensional para uma Fonte de Entrada em Degrau	478
	11.7.6	Solução para uma Fonte Pontual de Pulso	480
	11.7.7	Outras Soluções Mais Complexas	481
	11.8	Investigando a Contaminação	482
	11.8.1	Amostragem de Águas Subterrâneas	482
	11.8.2	Amostragem de Gases nos Poros	485
	11.8.3	Levantamentos Eletromagnéticos	485
	11.8.4	Investigando NAPLs	486

11.9	Remediando a Contaminação.....	487
11.9.1	Remoção ou Isolamento da Fonte.....	488
11.9.2	Recuperação de NAPL.....	490
11.9.3	Isolamento Hidráulico de Plumas de Solutos.....	491
11.9.4	Extração de Vapor do Solo.....	492
11.9.5	Biorremediação.....	495
11.9.6	Barreiras Reativas Construídas no Local.....	497
11.10	Problemas.....	498
CAPÍTULO 12	Fluxo de Calor no Subsolo e Energia Geotérmica	503
12.1	Introdução.....	503
12.2	Energia e Processos de Fluxo de Calor.....	504
12.2.1	Condução.....	506
12.2.2	Advecção.....	508
12.2.3	Equações Gerais de Energia e Fluxo de Calor... ..	508
12.2.4	Modelando o Fluxo de Calor.....	509
12.2.5	Modelo Analítico de Fluxo de Calor Unidimensional Estável.....	510
12.2.6	Modelo Analítico do Fluxo de Calor Unidimensional Cíclico Transiente.....	512
12.3	Temperaturas da Crosta e Fluxo de Calor.....	514
12.4	Temperaturas Superficiais.....	515
12.4.1	Impactos da Mudança Climática.....	516
12.4.2	Impactos da Recarga e da Descarga.....	518
12.5	Sistemas Hidrotérmicos e Gêiseres.....	521
12.6	Energia Geotérmica.....	524
12.6.1	Energia Elétrica Geotérmica.....	524
12.6.2	Armazenamento de Energia Térmica Subterrânea e Bombas de Calor.....	526
12.7	Problemas.....	529
	Apêndice A Unidades e Conversões.....	533
A.1	Comprimento [L].....	533
A.2	Área [L ²].....	533
A.3	Volume [L ³].....	533
A.4	Tempo [T].....	533
A.5	Massa [M] e peso [ML/T ²] na superfície da Terra.....	534
A.6	Força [ML/T ²].....	534
A.7	Pressão ou tensão [M/LT ²].....	534
A.8	Energia [ML ² /T ²].....	534
A.9	Potência [ML ² /T ³].....	534
A.10	Ângulo.....	534
A.11	Temperatura.....	535
A.12	Velocidade e Condutividade Hidráulica [L/T].....	535
A.13	Transmissividade [L ² /T].....	535
A.14	Descarga (Taxa de Fluxo) [L ³ /T].....	535
A.15	Prefixos de Unidade.....	535
A.16	Realizando Conversões de Unidade.....	536

Apêndice B Matemática Elementar	537
B.1 Álgebra e Geometria.....	537
B.2 Funções de uma Variável.....	538
B.3 Fórmulas para Derivadas Comuns	538
B.4 Funções de duas ou mais variáveis.....	539
Apêndice C Web Site do Livro	541
Respostas de Problemas Seleccionados.....	543
Referências.....	551
Índice.....	571

