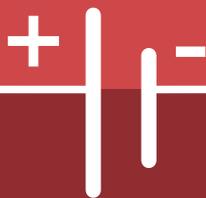
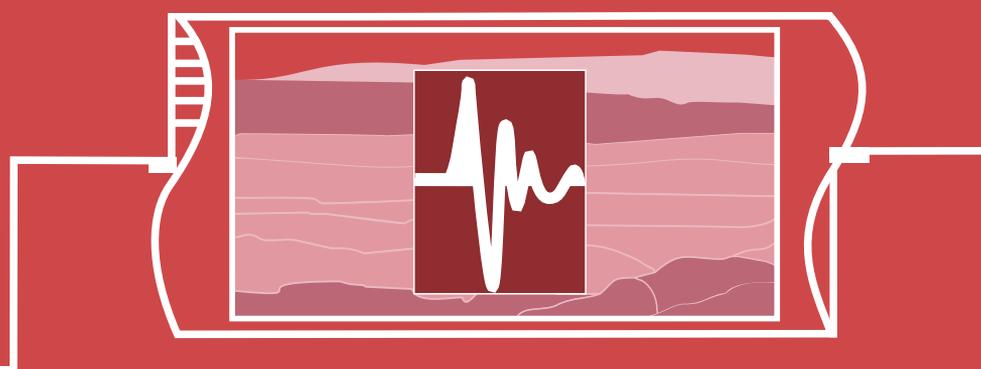


PROPRIEDADES FÍSICAS DAS ROCHAS

Bases da Geofísica Aplicada



Olivar Antônio Lima de Lima



INCT-GP



OLIVAR A. L. DE LIMA

Propriedades Físicas das Rochas
Bases da Geofísica Aplicada

Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia
de Geofísica do Petróleo – INCT-GP/CNPq

Sociedade Brasileira de Geofísica – SBGf
Rio de Janeiro RJ
2014

©2014 Sociedade Brasileira de Geofísica (SBGf)

É proibida a reprodução total ou parcial, por quaisquer meios, sem autorização por escrito das editoras.

Coeditoração do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Geofísica do Petróleo - INCT-GP/CNPq/MCT

Capa inspirada em arte de Márcia Uchoa

Revisão: Elizabeth Santos Ramos

Comissão editorial SBGf:

Secretário de Publicações: Renato Lopes Silveira

Editora de Publicações: Adriana Reis Xavier

Assistente de Publicações: Fabianna Mathias Sotero

Comissão editorial INCT-GP:

Amin Bassrei, Hédison Kiuity Sato, Jessé Carvalho Costa,

Joerg Dietrich Wilhelm Schleicher, Milton José Porsani, Sérgio Adriano Moura Oliveira,

Walter Eugênio de Medeiros

Ficha Catalográfica – Biblioteca do Observatório Nacional

P829	Lima, Olivar A. L. de Propriedades Físicas das Rochas. Bases da Geofísica Aplicada Olivar A. L. de Lima - Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica, 2014. 342p. : il. 21x29,5 ISBN: 978-85-88690-21-9 1. Geofísica 2. Petrofísica. 3. Propriedades físicas I. Sociedade Brasileira de Geofísica II. Título. CDU - 550.3
------	--

Sociedade Brasileira de Geofísica – SBGf
Av. Rio Branco 156, Sala 2509, Centro
CEP 20040-901–Rio de Janeiro–RJ
Tel./Fax: (55) 21 2533-0064
sbgf@sbgf.org.br
www.sbgf.org.br

Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia
de Geofísica do Petróleo - INCT-GP
R. Barão de Jeremoabo, s/n,
Instituto de Geociências
CEP 40170-115 Salvador-BA-Brasil
Tel./Fax: (55) 71 3283-8551
inct-gp@inct-gp.org
www.inct-gp.org

Aos colegas do Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia da Universidade Federal da Bahia (CPGG/UFBA) e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia – Geofísica do Petróleo, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (INCT-GP/CNPq) que, como eu, pesquisam sobre exploração de recursos minerais, água e petróleo, com preocupações sócio-econômicas e de conservação da Natureza.

Apresentação

Este livro é a segunda publicação conjunta entre a Sociedade Brasileira de Geofísica (SBGf) e o Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Geofísica do Petróleo (INCT-GP). O INCT-GP é um dos 122 projetos aprovados pelo CNPq como parte do Programa Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia (INCT), lançado em julho de 2008 e conta com apoio financeiro do CNPq, PETROBRAS e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes/MEC). O INCT-GP reúne professores e pesquisadores de cinco universidades brasileiras (UFBA, UFPA, UFRN, UNICAMP e UENF) que atuam na pesquisa e formação de recursos humanos nas áreas de geofísica, geologia e engenharia de reservatórios.

O livro analisa de forma sistemática as propriedades físicas de minerais e rochas relacionadas à geofísica de exploração. Apresenta resultados teóricos e experimentais desenvolvidos e investigados pelo autor, descrevendo e analisando os efeitos da composição, textura e interação fluido-sólido nas rochas, bem como o relacionamento, com as propriedades hidráulicas, elétricas, magnéticas, elásticas, térmicas e radioativas, e correspondentes relações analíticas e empíricas entre as várias propriedades mensuráveis através dos métodos geofísicos. O livro sintetiza a vasta experiência do autor como professor da Universidade Federal da Bahia (UFBA) e pesquisador do Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia (CPGG/UFBA), ao longo dos últimos 40 anos.

Salvador, setembro de 2014

Milton José Porsani Coordenador INCT-GP

Sumário

Apresentação	7
Sumário	9
Lista de Figuras	13
Lista de Tabelas	19
Prefácio	21
1 Propriedades físicas das rochas	25
1.1 Origem e classificação das rochas	26
1.1.1 Intemperismo e diagênese	31
1.1.2 Deformações rúpteis	34
1.1.3 Rochas reservatórios	36
1.1.4 Depósitos de minérios	39
1.2 Propriedades físicas da matéria	40
1.2.1 Propriedades de massa	41
1.2.2 Propriedades visco-elásticas	43
1.2.3 Propriedades elétricas	45
1.2.4 Propriedades magnéticas	47
1.2.5 Propriedades térmicas	51
1.3 Propriedades físicas das rochas	52
1.3.1 Misturas generalizadas	54
1.3.2 Misturas auto-consistentes	56
1.4 Conclusões	60
1.5 Referências bibliográficas	61
2 Propriedades hidráulicas das rochas	65
2.1 Fluidos em meios porosos	66
2.1.1 Vazão e potencial hidráulico	67
2.1.2 Molhabilidade e capilaridade	70
2.2 Parâmetros de reservatórios	74
2.2.1 Porosidade	75
2.2.2 Superfície específica	80

2.2.3	Tortuosidade e fator de formação	82
2.2.4	Classificação granulométrica	83
2.2.5	Dimensões de poros	85
2.2.6	Geometria de fraturamentos	86
2.3	Propriedades de armazenagem	89
2.4	Propriedades de transporte	92
2.4.1	Permeabilidade unifásica	92
2.4.2	Limites da lei de Darcy	94
2.4.3	Derivação da lei de Darcy	95
2.4.4	Permeabilidade de rochas fraturadas	97
2.4.5	Permeabilidade relativa	107
2.4.6	Dispersão hidrodinâmica	109
2.5	Conclusões	115
2.6	Referências bibliográficas	115
3	Propriedades elétricas das rochas	119
3.1	Propriedades elétricas da matéria	120
3.1.1	Condutividade elétrica	120
3.1.2	Permitividade dielétrica	127
3.1.3	Permeabilidade magnética	129
3.2	Processos interfaciais	130
3.2.1	Dupla camada elétrica	132
3.2.2	Condutividade superficial	136
3.3	Condutividade elétrica das rochas	139
3.3.1	Modelos empíricos e semi-empíricos	139
3.3.2	Modelos analíticos	146
3.4	Permitividade dielétrica das rochas	156
3.5	Polarização elétrica nas rochas	157
3.5.1	Representação de Debye	160
3.5.2	Tratamento macroscópico da dispersão	162
3.5.3	Dielétricos condutivos	164
3.5.4	Modelos granulares	165
3.5.5	Tratamento microscópico da dispersão	168
3.5.6	Modelos de circuitos	177
3.6	Conclusões	179
3.7	Referências bibliográficas	180
4	Propriedades magnéticas das rochas	187
4.1	O campo geomagnético	188
4.2	Propriedades magnéticas da matéria	189
4.2.1	Curva de magnetização	193
4.3	Tipos de magnetismo	195
4.3.1	Diamagnetismo	195
4.3.2	Paramagnetismo	197

4.3.3	Ferromagnetismo.....	198
4.4	Propriedades magnética das rochas.....	203
4.5	Magnetização das rochas.....	205
4.6	Conclusões.....	209
4.7	Referências bibliográficas.....	209
5	Propriedades elásticas das rochas	211
5.1	Tensão e deformação.....	212
5.1.1	Lei de Hooke.....	215
5.2	Ondas elásticas.....	218
5.2.1	Potenciais deslocamentos.....	220
5.2.2	Soluções de onda plana.....	221
5.3	Propriedades elásticas das rochas.....	221
5.3.1	Matrizes sólidas porosas.....	234
5.3.2	Arquiteturas granulares.....	236
5.3.3	Sólidos laminados.....	240
5.3.4	Sólidos fendilhados.....	242
5.3.5	Sólidos fraturados.....	244
5.4	Atenuação sísmica.....	250
5.5	Conclusões.....	251
5.6	Referências bibliográficas.....	252
6	Propriedades térmicas das rochas	255
6.1	Propriedades térmicas.....	256
6.2	Condutividade térmica das rochas.....	260
6.3	Conclusões.....	268
6.4	Referências Bibliográficas.....	268
7	Propriedades radioativas das rochas	271
7.1	Estrutura do átomo.....	272
7.2	Radioatividade natural.....	273
7.3	Radioatividade artificial.....	277
7.4	Interação com a matéria.....	280
7.5	Conclusões.....	287
7.6	Referências bibliográficas.....	287
8	Inter-relações e avaliações petrofísicas	291
8.1	Avaliação de reservatórios.....	292
8.1.1	Propriedades de massa e porosidade.....	294
8.1.2	Propriedades elétricas, porosidade e permeabilidade.....	295
8.1.3	Propriedades elásticas e porosidade.....	300
8.1.4	Propriedades térmicas e porosidade.....	304
8.1.5	Relações entre propriedades físicas.....	305
8.2	Avaliações ambientais.....	308
8.3	Avaliação mineral e geotécnica.....	315

8.4	Conclusões	318
8.5	Referências Bibliográficas	318
	Lista de Símbolos	323
	Índice Remissivo	333

Lista de Figuras

1.1	Variações estruturais e texturais em alguns tipos comuns de rochas sedimentares clásticas.....	28
1.2	Variações estruturais e texturais em alguns tipos comuns de rochas magmáticas (Fotos cedidas por Geraldo Lima).	30
1.3	Variações estruturais e texturais em alguns tipos comuns de rochas metamórficas.	30
1.4	Perfil de intemperismo desenvolvido em região tropical, com as principais características de seus diferentes horizontes.	32
1.5	Variações estruturais, texturais e de permeabilidade em zonas de falhas que seccionam arenitos.....	36
1.6	Esquema conceitual para a viscosidade dinâmica de um fluido Newtoniano, num fluxo entre placas sólidas paralelas.	45
1.7	Condutividade elétrica de soluções de cloreto de sódio, em função da concentração e da temperatura.....	48
1.8	Esquema de variação de uma propriedade física de rocha em função da escala de medição: Conceito de EVR.....	54
1.9	Relações petrofísicas para misturas binárias com diferentes valores do parâmetro d	56
1.10	Modelo granular disperso, aproximado como uma mistura de partículas esféricas, suspensas num fluido contínuo.....	57
2.1	Zonas de água do solo e distribuição de umidade na subsuperfície terrestre.....	68
2.2	Condição de equilíbrio estático nas interfaces entre uma superfície sólida e duas fases fluidas imiscíveis.	71
2.3	Molhabilidade de superfícies sólidas por fluidos de diferentes tensões interfaciais.	71
2.4	Tipos básicos de saturações parciais de fluidos imiscíveis em reservatórios naturais.	72
2.5	Pressão capilar entre dois fluidos imiscíveis no interior de um conduto tubular.	72
2.6	Relação experimental entre p_c e S_m observada em reservatórios petrolíferos granulares.	74

2.7	Relação entre porosidade volumétrica e porosidades médias em área e linear.	76
2.8	Tipos de porosidades para corpos rochosos de diferentes origens.	77
2.9	Arranjos tridimensionais estáveis de esferas de mesmo tamanho e efeitos na porosidade volumétrica.	78
2.10	Variação da porosidade e da superfície específica com a argilosidade, para um modelo transicional de arenito argiloso.	79
2.11	Curvas de distribuição de tamanhos de grãos para amostras representativas de sedimentos e rochas granulares friáveis.	84
2.12	Distribuição esquemática de gargalos e corpos de poros, em materiais porosos granulares	86
2.13	Distribuição espacial, geométrica e funcional, de aberturas em fraturas isoladas de um EVR de um meio rochoso fraturado.	87
2.14	Descrição geométrica da variável abertura bidimensional numa fratura de paredes rugosas.	88
2.15	Elemento de volume EVR de um meio poroso localizado em profundidade no subsolo.	89
2.16	Esquema ilustrativo da definição de coeficiente de armazenamento elástico de um reservatório natural.	90
2.17	Representação do experimento de Darcy em tubos com filtros de areias.	93
2.18	Limites superior e inferior de validade da lei de Darcy.	95
2.19	Modelos de tubos capilares usados para representar a permeabilidade de meios porosos granulares.	96
2.20	Relações experimentais entre porosidade e permeabilidade observadas para vários tipos de arenitos.	97
2.21	Representação esquemática do fluxo hidráulico numa fratura de um sistema poroso fraturado.	102
2.22	Representação esquemática do fluxo hidráulico num sistema poroso com fraturamentos paralelos.	103
2.23	Representação esquemática do fluxo hidráulico num sistema poroso com fraturamentos conjugados.	105
2.24	Relações experimentais para as permeabilidades relativas de dois fluidos não-miscíveis, em fluxo simultâneo num reservatório.	108
2.25	Representação esquemática do fenômeno da dispersão hidrodinâmica em meios porosos.	109
2.26	Esquema da dispersão hidrodinâmica no fluxo de fluidos miscíveis no interior de um tubo cilíndrico.	111
2.27	Dispersão hidrodinâmica no modelo de canais ramificados adotado por De Jong (1958).	113
3.1	Modelos quânticos para a distribuição de energia de elétrons num átomo isolado ou fazendo parte de uma estrutura cristalina.	121
3.2	Variações na resistividade elétrica de soluções de cloreto de sódio com a concentração e com a temperatura.	125

3.3	Variações na resistividade elétrica com a concentração para soluções eletrolíticas dos principais sais de águas naturais.	126
3.4	Estrutura de uma dupla camada de cargas na vizinhança de uma interface sólida carregada e um eletrólito.	133
3.5	Distribuições do potencial elétrico e concentrações iônicas na vizinhança da interface de um sólido carregado e uma solução de NaCl. . .	135
3.6	Resultados experimentais para o fator de resistividade de formações saturadas, em função de sua porosidade interconectada.	140
3.7	Resultados experimentais de condutividade de arenitos argilosos (100 % saturados), em função da condutividade do eletrólito.	142
3.8	Procedimento usado por Bruggeman para construção de um modelo concentrado de esferas imersas num fluido contínuo.	147
3.9	Ajustes de dados de condutividade elétrica de arenitos argilosos, em função da condutividade da água, à modelos petrofísicos volumétricos.	154
3.10	Representação esquemática para a condutividade elétrica de uma amostra de rocha com uma fratura axial cheia de eletrólito.	154
3.11	Dispersão elétrica em dados experimentais de arenitos argilosos observados no domínio da frequência.	158
3.12	Variações espectrais das componentes real e imaginária da permitividade de um dielétrico de Debye.	161
3.13	Diagrama de Argand para a relaxação dielétrica de Debye.	161
3.14	Modelo de Maxwell-Wagner para a polarização interfacial entre dois materiais dielétricos.	166
3.15	Modelo de Wagner para uma suspensão diluída de partículas dielétricas esféricas.	167
3.16	Representação esquemática de películas de cargas em torno de partículas sólidas carregadas de um composto auto-consistente.	170
3.17	Diagrama de Argand para a polarização da camada difusa no modelo de condutividade volumétrica complexa (Lima e Sharma, 1992).	176
3.18	Modelo de condutividade volumétrica complexa para a polarização de membrana de arenitos argilosos (Lima e Sharma, 1992).	177
3.19	Modelos de circuitos equivalentes para a polarização induzida observada em rochas.	178
3.20	Modelo de circuitos de Dias para as polarizações de eletrodo e de membrana (Dias, 1972; 2000).	178
4.1	Elementos do campo geomagnético num ponto qualquer da vizinhança da superfície terrestre.	188
4.2	Campo geomagnético de um dipolo geocêntrico inclinado, e relações com valores reais observados.	189
4.3	Padrões de circulação de correntes elétricas em meios prismáticos discretamente magnetizados.	191
4.4	Modelo de circulação de correntes elementares em materiais cuja magnetização varia continuamente em seu interior.	192

4.5	Representação esquemática de curvas experimentais da magnetização de um material ferromagnético.	194
4.6	Varição da magnetização de saturação, normalizada por M_s , em função da temperatura para um material ferromagnético.	194
4.7	Varição da susceptibilidade magnética com a temperatura para um material ferromagnético.	195
4.8	Esquema da distribuição de energia num cristal ferromagnético (Nagata, 1961).	200
4.9	Estruturas de domínios internos de magnetização em cristais de materiais ferromagnéticos (Stacey, 1969).	200
4.10	Distribuição da energia total num cristal ferromagnético e deslocamento de paredes de domínios por campos magnéticos.	201
4.11	Curvas de magnetização para um cristal mono-domínio magnético, em função da orientação do campo magnético aplicado.	202
4.12	Estruturas de domínios representativas de materiais ferrimagnéticos e anti-ferromagnéticos típicos.	202
5.1	Tensão triaxial num elemento de volume EVR de um sólido elástico.	213
5.2	Estado de deformação gerado por um sistema de tensão triaxial num corpo material elástico.	214
5.3	Deformações elásticas de uma barra sólida sujeita a uma compressão uniaxial.	215
5.4	Força mecânica resultante, atuando num elemento de volume de material elástico.	219
5.5	Fases de deformação no comportamento mecânico de uma amostra de rocha, num ensaio de compressão uniaxial.	222
5.6	Dados experimentais mostrando a dependência de V_P e V_S com a pressão em rochas densas (Nur e Simmons, 1970).	226
5.7	Curvas experimentais mostrando a dependência de V_P com a temperatura, em rochas densas (Kern, 1990).	226
5.8	Dados experimentais de velocidade V_P em arenitos saturados com água e curvas de ajuste aos dados (Wang e Nur, 1992).	229
5.9	Dados experimentais de velocidade V_P medidos em amostras de sedimentos marinhos recentes (Wang e Nur, 1992).	230
5.10	Variações com ϕ de K e μ medidos e calculados, para areias e arenitos saturados com água (Wang e Nur, 1992).	231
5.11	Variações com ϕ de V_P e V_S de arenitos limpos e argilosos, saturados com água (Han et al., 1986).	232
5.12	Relações entre V_P e ϕ para arenitos 100% saturados de água (Blangy et al., 1993).	233
5.13	Relações entre V_P e ϕ para arenitos 100% saturados de água, para diferentes argilosidades (Blangy et al., 1993).	234
5.14	Dados de V_P e V_S de arenitos, comparados a valores calculados com a teoria de Gassmann (Wang e Nur, 1992).	236

5.15	Dados de V_P e V_S de rochas carbonáticas, comparados a valores calculados com a teoria de Gassmann (Wang e Nur, 1992).	237
5.16	Arranjo cúbico de esferas e forças relacionadas a condição de confinamento e a propagação de distúrbios elásticos.	238
5.17	Representação esquemática de uma fenda elíptica numa célula unitária de meio sólido fendilhado.	243
5.18	Representação esquemática do fechamento de fendas rugosas com o aumento da pressão confinante.	245
5.19	Representação esquemática do fechamento de fendas rugosas com o aumento da pressão confinante.	247
5.20	Representação esquemática de uma fratura como um conjunto de fendas elípticas zoneadas num EVR fraturado.	248
6.1	Faixas de valores de condutividade térmica para os principais grupos de rochas da crosta terrestre.	266
6.2	Dados experimentais e modelos teóricos representativos de condução térmica nas rochas.	267
7.1	Principais radiações γ emitidas por minerais radioativos (Bristow, 1983).	274
7.2	Séries de decaimento radioativo das famílias do urânio, do actínio e do tório (Killeen, 1982).	276
7.3	Energia potencial de um nêutron próximo a um núcleo atômico (Harvey, 1969).	279
7.4	Energia potencial de um próton próximo a um núcleo atômico (Harvey, 1969).	279
7.5	Interação elástica entre um nêutron e um núcleo atômico (Harvey, 1969).	281
7.6	Espalhamento Compton da radiação γ por elétrons de um átomo (Harvey, 1969).	284
7.7	Regiões de prevalência das principais formas de interação da radiação γ com elétrons (Harvey, 1969).	285
7.8	Absorção da radiação γ pelo material de uma placa de espessura elementar dh	286
8.1	Modelo petrofísico para representar a variabilidade textural - granulométrica de arenitos argilosos.	293
8.2	Modelo petrofísico para meios porosos granulares contendo argilas, conforme proposto por Lima (2007).	294
8.3	Relação experimental entre permeabilidade e fator litologia observada em arenitos argilosos.	298
8.4	Dados de perfilagem geofísica de um poço perfurado no aquífero São Sebastião, bacia do Recôncavo.	299
8.5	Perfis geofísicos de um poço de exploração de petróleo da bacia do Recôncavo e sua avaliação petrofísica.	302
8.6	Perfis de avaliação petrofísica de um poço de exploração de petróleo da bacia do Recôncavo.	304

8.7	Valores de velocidade sônica em matrizes areno-argilosas de textura de grãos capeados.	307
8.8	Mapa de contorno da resistividade verdadeira do aquífero Marizal na área da Caraíba Metais.	310
8.9	Pseudo-seções de resistividade e cargabilidade aparentes e modelo geológico interpretado da linha EF, indicada na Figura 8.8.	310
8.10	Perfis geofísicos do poço de monitoramento PP-1, mostrando as características da pluma ácida da Caraíba Metais.	311
8.11	Mapa de contorno da resistividade verdadeira do aquífero no entorno dos depósitos de lixos e do curtume de Alagoinhas.	312
8.12	Seção geo-elétrica transversal C – C' e modelo geológico interpretado para a anomalia condutiva da Figura 8.11.	313
8.13	Perfis elétricos obtidos com arranjos normais de eletrodos no poço PM-4, na área dos depósitos de lixos e do curtume.	314
8.14	Fotografias ilustrativas do deslizamento de um talude ocorrido na Avenida L. E. Magalhães em 2005.	316
8.15	Pseudo-seções de resistividade aparente e verdadeira transversais a região do deslizamento de talude na Av. L. E. Magalhães.	317

Lista de Tabelas

1.1	Massa específica de alguns minerais componentes principais e acessórios de rochas, sob condições ambientais (Clark Jr., 1966).	41
1.2	Massa específica de alguns fluidos sob pressão de 1 atm, em função da temperatura (Riley e Skirrow, 1975; Batzle e Wang, 1992).	43
1.3	Compressibilidade de fluidos, sob pressão de 1 atm, em função da salinidade e da temperatura (Batzle e Wang, 1992).	44
1.4	Viscosidade dinâmica de fluidos, sob pressão de 1 atm, em função da salinidade e da temperatura (Clark Jr., 1966; Batzle e Wang, 1992).	45
1.5	Resistividade elétrica e constante dielétrica de minerais de minério e de minerais formadores de rochas (Shön, 1998).	48
1.6	Condutividade térmica e calor específico de alguns minerais formadores de rochas e de depósitos minerais (Schön, 1998).	52
1.7	Condutividade térmica de alguns fluidos sob pressão de 1 atm, em função da temperatura (Schön, 1998).	52
2.1	Valores típicos da porosidade total de materiais geológicos naturais (Davis, 1969).	76
3.1	Condutividade elétrica de minerais de minério e de minerais formadores de rochas (Daknov, 1962; Clark Jr., 1966; Parkomenko, 1967).	122
3.2	Resistividade elétrica ($\Omega.m$) de soluções de cloreto de sódio (Keller e Frisknecht, 1966).	126
3.3	Equivalentes químicos, equivalentes NaCl e mobilidade iônica de íons de águas de formações (Orellana, 1972).	127
3.4	Constante dielétrica de minerais em altas frequências (Clark Jr., 1966; Olhoeft, 1981).	128
4.1	Susceptibilidade magnética dos principais minerais formadores e acessórios de rochas (Hunt et al., 1995).	199
4.2	Susceptibilidade magnética de alguns tipos representativos de rochas ígneas, metamórficas e sedimentares (Hunt et al., 1995).	203
5.1	Relações algébricas entre propriedades elásticas de meios homogêneos e isotrópicos (White, 1983).	216

5.2	Constantes elásticas de minerais constituintes das rochas, sob condições normais (Rzhevsky e Novik, 1971; Schön, 1998).	223
5.3	Compressibilidade isotérmica e velocidade compressional na água, a 1 atm de pressão, em função da temperatura (Riley e Skirrow, 1975). .	224
5.4	Intervalos e valores médios de velocidades de ondas elásticas em rochas ígneas e metamórficas (Schön, 1998).	225
5.5	Intervalos e valores médios de velocidades de ondas sísmicas em rochas sedimentares (Schön, 1998).	227
6.1	Calor específico de alguns materiais geológicos típicos (Buntebarth, 1984).	258
6.2	Coeficiente de expansão térmica da água pura e da água do mar, em função da temperatura (Riley e Skirrow, 1975).	259
6.3	Condutividade térmica e coeficiente de expansão volumétrica de minerais constituintes de rochas (Clark Jr., 1966; Schön, 1998).	261
6.4	Condutividade térmica da água (W/mK) em função da pressão e da temperatura (Clark Jr., 1966).	262
6.5	Condutividade e difusividade térmicas de algumas rochas sob condições ambientais normais (Schön, 1998).	262
6.6	Condutividade térmica de rochas cristalinas e sedimentares da bacia do Recôncavo (Lobo e Fontes, 1982).	263
6.7	Condutividade térmica de vários materiais geológicos, medida sob condições ambientais normais (Clark Jr., 1966).	267
7.1	Constante de decaimento e meia vida de alguns elementos radioativos da Terra (Stacey, 1969; Kappelmeyer e Haenel, 1974).	275
7.2	Seção transversal de captura e de espalhamento de nêutrons de baixa energia (Linch, 1966).	283
7.3	Razão $2Z/A$ para alguns elementos comuns de rochas (Schlumberger, 1972).	285

Prefácio

Em geofísica aplicada – à exploração de petróleo, água subterrânea e depósitos minerais – a interpretação de dados medidos no ar, no mar, na superfície terrestre ou no interior de poços, apoia-se no conhecimento das propriedades físicas das rochas envolvidas, que dependem das propriedades de seus componentes mineralógicos, microestruturas internas e de sua evolução geológica. Além disso, na avaliação e no monitoramento de reservatórios e na exploração de recursos naturais, são fundamentais as correlações existentes entre propriedades medidas e/ou interpretadas da geofísica e as propriedades de armazenamento/transporte de fluidos e de conteúdo de minérios das rochas.

A interpretação de uma estrutura geológica normalmente se inicia com um exame cuidadoso dos resultados de um levantamento geofísico de campo. Após as correções e a redução de ruídos de várias espécies, que podem ser processados desde a fase de aquisição, esses resultados são invertidos para gerar um modelo geológico para a subsuperfície terrestre. Este modelo, representado na forma de perfis ou mapas, reflete a distribuição espacial da propriedade física do subsolo envolvida no método geofísico utilizado. Com a calibração e ajuste do modelo, usando informações advindas de outras fontes, a distribuição da propriedade avaliada pode ser transformada em distribuições de outras propriedades de interesse do problema focalizado (tal como, por exemplo, porosidade, argilosidade, teor e composição de minérios, resistência mecânica e propriedades de transporte de massa e de energia). Para tanto, é necessário construir modelos na forma de relações matemáticas entre essas diferentes propriedades, derivadas teoricamente com base em leis fundamentais da física, ou obtidas por procedimentos empíricos de laboratório.

Em função dos avanços recentes na instrumentação eletrônica e na computação, a moderna geofísica aplicada permite extrair, hoje, mais informações sobre a subsuperfície terrestre do que a simples determinação da natureza e da estrutura do solo e subsolo. Aliada às novas técnicas de aquisição e processamento de dados, esta ciência estende seu campo de atuação desde a prospecção/exploração de recursos naturais, ao desenvolvimento e avaliação dessa produção, até à definição das alterações ambientais que essas atividades provocam na derme da Terra.

O estudo das propriedades físicas das rochas, seja do ponto de vista teórico, seja do experimental, constitui assunto vasto e complexo de várias disciplinas, aqui agrupadas sob o termo petrofísica. Originalmente restrito a área da avaliação de reservatórios de hidrocarbonetos, este tema hoje expandiu-se para toda a geofísica aplicada, com destaque para as áreas da hidrologia subterrânea, geotecnia e estudos de alterações

ambientais, especialmente aquelas derivadas das atividades humanas. Portanto, a petrofísica é um campo interdisciplinar das ciências da Terra, da Física e da Engenharia, que estuda as propriedades físicas das rochas e de outros materiais geológicos delas derivados. Tais propriedades refletem a composição mineralógica do material, a textura ou arranjo espacial dos componentes sólidos, e as distribuições de espaços vazios (poros e fraturas) e fluidos intersticiais. Engloba também a explicitação das interconexões existentes entre as várias propriedades físicas das rochas que são medidas ou interpretadas dos dados geofísicos.

Meu interesse pela petrofísica surgiu, naturalmente, em função da necessidade de se extrair a máxima informação que está disponível na moderna geofísica aplicada. Com equipamentos de alta precisão e confiabilidade obtém-se, hoje, informações físicas da subsuperfície com altas densidades de amostragens. Esse volume crescente de medidas precisa ser adequadamente transformado em informações úteis, seja para a avaliação e monitoramento de reservatórios, seja para a melhor exploração de depósitos minerais e outros recursos naturais.

Neste texto, são analisadas, de forma sistemática, as propriedades físicas de minerais e de rochas envolvidas em estudos geofísicos da crosta, com ênfase nos aspectos da geofísica de exploração. Essas propriedades, de escala meso ou macroscópica, são definidas a partir de leis ou relações constitutivas da física. Resultados de pesquisas experimentais representativas são analisados para destacar os efeitos da composição, da textura e das interações fluidos-sólidos nas rochas. Aspectos fundamentais da modelagem do comportamento físico das rochas também são discutidos no intuito de quantificar essas influências e permitir obter inter-relações matemáticas entre diferentes propriedades petrofísicas. A motivação para produzi-lo foi a de disponibilizar, em português, um material didático básico sobre esse tema interdisciplinar, que possa ser útil ao embasamento teórico-experimental dos cursos de graduação e pós-graduação em geofísica no Brasil.

Uma questão fundamental precisa ser claramente explicitada. Tento mostrar, neste texto, que as ciências da terra e as engenharias são essenciais para que a humanidade extraia da natureza os recursos necessários à sua subsistência e conforto. Todavia, é necessário também salientar que essas atividades precisam ser exercidas com compromissos de conservacionismo, reciclagem e substituições de matérias primas. Além disso, precisam ser fiscalizadas com rigor, por organizações da sociedade, criadas para promover a recuperação e recomposição de áreas exploradas. Só assim se poderá garantir a habitabilidade do planeta e uma sobrevivência prolongada para nossa espécie.

Vários resultados apresentados no livro foram de projetos de pesquisa apoiados pelo Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, do Ministério de Ciência e Tecnologia, pela Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP, do Ministério de Planejamento, pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia – FAPESB e pela Petróleo Brasileiro S/A – PETROBRAS. Agradeço o suporte financeiro obtido dessas instituições.

Desejo também expressar agradecimentos àquelas pessoas que, de algum modo, influíram e contribuíram para minha formação científica. Destaco, Joel G. Valença e Luiz A. M. da Costa no campo da geologia, José M. F. Bassalo e Carlos A. Dias pelos

ensinos em física, matemática e geofísica, Bimal K. Battacharyya, Ronald D. Barker, Mukul M. Sharma e Michael B. Clennell pelas interações em geofísica e petrofísica. À amiga Yeda de A. Ferreira pelo estímulo ao exercício de uma ciência de qualidade e à minha esposa Gislene G. Lima pela paciência e atenção a um professor pesquisador.

Agradeço ao amigo e Coordenador do CPGG/UFBA, Hédison K. Sato, pela contínua assistência sobre \LaTeX e pela revisão crítica de todos os capítulos do livro, com correções gramaticais e comentários úteis para seu aprimoramento. À amiga Elizabeth Santos Ramos pela cuidadosa revisão do texto final. Ao Milton J. Porsani, Coordenador do INCT – Geofísica de Petróleo do CNPq, pelas sugestões e apoio para sua publicação através da Sociedade Brasileira de Geofísica – SBGf. Espero que muitos estudantes de geociências encontrem, em suas páginas, elementos para uma sólida formação em geofísica.

Tentei construir um texto impessoal e o mais completo possível, em minha avaliação. Em sete capítulos básicos, são analisadas, consistentemente, as propriedades físicas das rochas detríticas de porosidade intersticial, das rochas sedimentares químicas e biogênicas e das rochas ígneas e metamórficas de porosidade fissural, que constituem os principais hospedeiros de depósitos minerais, de reservatórios naturais de petróleo e de água subterrânea do planeta. No oitavo capítulo são discutidas as interações petrofísicas entre as várias propriedades medidas por geofísica, assim como as relações analíticas e empíricas usadas para derivar propriedades hidráulicas a partir delas. Alguns exemplos de aplicação desses resultados na avaliação de reservatórios e na exploração mineral e geotecnia são discutidos nas seções finais.

Salvador, setembro de 2014

Olivar Antônio Lima de Lima