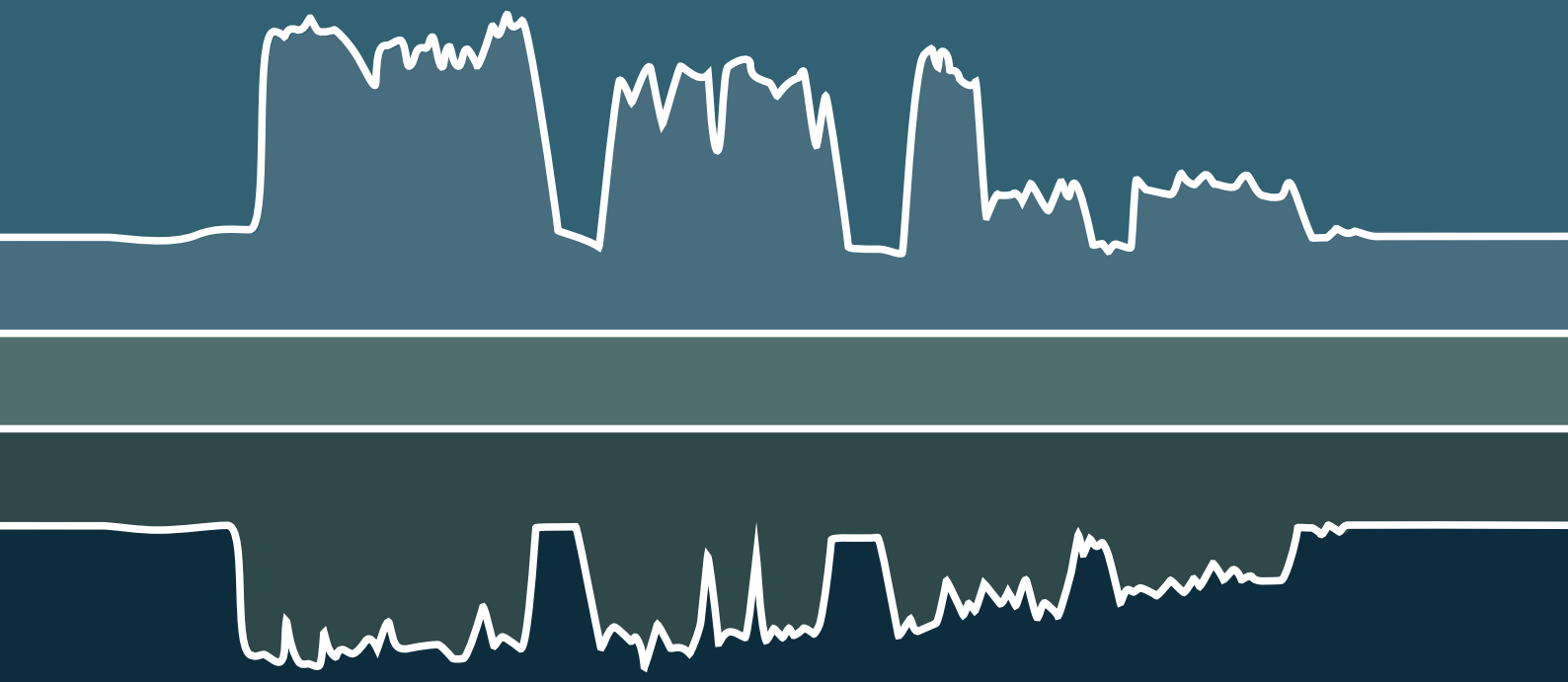
PERFILAGEM GEOFÍSICA EM POÇO ABERTO

FUNDAMENTOS BÁSICOS COM ÊNFASE EM PETRÓLEO



Geraldo Girão Nery

SBGf

INCT-GP

Geraldo Girão Nery

Perfilagem Geofísica em Poço Aberto

Fundamentos básicos com ênfase em petróleo

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

Sociedade Brasileira de Geofísica – SBGf
Rio de Janeiro – RJ
2013

©2013 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: Simone Basilio

Comissão editorial SBGf:
Secretário de Publicações: Luiz Geraldo Loures
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 elaborada pela Biblioteca do Observatório Nacional – ON

N454 Nery, Geraldo Girão
Perfilagem Geofísica em Poço Aberto - fundamentos básicos com ênfase em petróleo. - Rio de Janeiro: SBGf, 2013.
222p.
ISBN: 978-85-88690-19-6

1. Perfilagem geofísica. 2. Geofísica de poço.
3. Petrofísica. I Título.
CDU 550.832

Sociedade Brasileira de Geofísica – SBGf
Av. Rio Branco 156, Sala 2509
CEP 20040-901– Centro – 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

Apresentação

Este livro é a primeira publicação conjunta entre a Sociedade Brasileira de Geofísica (SBGf) e o Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Geofísica do Petróleo (INCT-GP/CNPq). 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 5 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 apresenta os fundamentos teóricos dos métodos de perfilagem geofísica de poços, com ênfase na aplicação à exploração de petróleo e água subterrânea. A sua diagramação e formatação foi feita com o sistema LaTeX, utilizando equipamentos e recursos humanos do Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia da Universidade Federal da Bahia (CPGG/UFBA).

O professor Girão possui vasta experiência na área, adquirida como geocientista da PETROBRAS, consultor, empresário e como professor participante dos Programas de Pós-graduação em Geofísica da UFPA e da UFBA e Curso de Graduação em Geofísica da UFBA, que contam com o apoio de convênios da ANP e PETROBRAS para a formação de recursos humanos no setor petróleo e gás.

Prefácio

Nascido e criado em Fortaleza, estudei em escolas públicas e me formei em Engenharia Agronômica. Entrei para a Petrobras, vim para Salvador e em dois anos ela, com ajuda de um bando de gringos, me transformou em geólogo.

Fui designado para uma equipe de geologia de superfície (TG-6) que mapeava o alto estrutural localizado entre as bacias de Sergipe-Alagoas e as bacias baianas do Recôncavo, Tucano e Jatobá. Em seguida fui designado para a TG-7, para realizar idêntico trabalho no leste e nordeste de Sergipe.

A vida era dura, andando a pé, de jipe, e até em saveiro vazando água do Velho Chico. Naquela época nós trabalhávamos 40 dias mapeando no campo e tínhamos 10 dias de folga, em Maceió, sede do antigo Serdeste (Setor de Exploração do Nordeste).

Longe dos familiares, sem a facilidade e rapidez dos celulares atuais, passava as minhas folgas em um *hobby* sofisticado, o radioamadorismo, a construir transmissores para emitir e receber torpedos diários da família e notícias da terrinha, a ocupar os macanudos conterrâneos.

Um belo dia, fui abordado por meu chefe a perguntar se eu estaria disposto a fazer um curso de perfilagem, a ser dado por um alemão da Schlumberger. Pedi mais informações e fui esclarecido em rápidas palavras sobre o que era aquilo. Como eu tinha algum conhecimento prévio de eletricidade, ele achava que eu seria bem sucedido.

Não sei se foi minha sorte ou meu azar. O fato é que gostei bastante do assunto. Todavia, levei o maior susto quando, tão logo retornei, me deram a chave de um jipe e disseram: vá perfilar um poço lá em Sergipe. Se vira. Só para chegar à locação devo ter gastado umas 12 horas naquelas estradas de barro esburacadas e a travessia de balsa. Asfalto, só até a saída do aeroporto de Maceió.

Lá chegando, o geólogo do poço apertou minha mão, entregou-me as pastas do poço em perfuração e as pastas dos poços de correlação, disse-me "tchau e benção". Sumiu. Fiquei sozinho a pensar no que havia me metido. Quanto maior a dificuldade, maior a glória. Arregacei as mangas e fui à luta, companheiro.

Passamos a noite acordados, eu e minha régua de cálculo (sim, as máquinas de calcular só viriam muito depois, e os *laptops* então...), olhando aquelas fitas de papel com mais de 1000 m de poço, cheias de, ainda, garatujas para mim. Não teve uma só baixa radioatividade e uma só deflexão do SP da qual eu não tivesse calculado a saturação em água, usando a velha equação de Archie.

O peso da responsabilidade era grande, porque naquele tempo o geólogo era quem recomendava a completação ou o abandono do poço. Mesmo tremendo nas bases, decidi abandoná-lo. Entreguei ao *pusher* os intervalos de tampão de abandono e, sonolento ainda, voltei. Ao retornar a Maceió, só respirei aliviado quando concordaram com o que eu havia feito.

O tempo foi passando, eu sempre acompanhando perfilagens e interpretando. As perfilagens, coincidentemente, sempre ocorrem nos

feriados, finais de semana e à noite. As ferramentas de então eram analógicas, cheias de válvulas, fios e painéis e apresentavam bastantes problemas.

Nas plataformas, as perfilagens duravam semanas e não noites. Frequentemente, esperávamos horas, ou dias a fio, para que uma ferramenta fosse substituída, vinda de lanchas ou rebocador. Helicóptero, só muito depois. Tínhamos que subir em cestas ou pular da lancha para os navios *tenders*, no balanço das ondas. Tudo era juventude e entusiasmo.

Feriados, natais e carnavais, quase sempre embarcado à espera de uma ferramenta para a substituição de uma que não funcionara a contento, ou à espera de que fosse feito o recondicionamento da lama após eventuais *kicks*, como em Caioba.

Certo dia, pensei: "Por que não ensinar aos geólogos de poço como acompanhar e interpretar perfis?" Peguei um deles à unha, como primeira cobaia. Sentados lado a lado à minha mesa, comecei a mostrá-lo como as curvas se comportavam e o que deveria ser feito. Não é que deu certo?!

Comecei com um recém-formado e, quando me dei conta, eram mais de 10, que chegavam anualmente a Aracaju, para onde a sede havia se deslocado após a descoberta de Carmópolis, em Sergipe. Foram várias turmas em sala, com cuspe e giz, transparências, provinhas e tudo o mais que um professor tinha direito.

Noutro dia, vi-me designado para ensinar geólogos antigos, em Salvador, no que se denominava, à época, de curso de atualização de técnicas exploratórias (Catepe), no setor de ensino da Bahia (Senba), precursor da atual Universidade Petrobras.

Fui acumulando experiência, de tal sorte que acabei deixando o que hoje se denomina E & P e passei para RH, transferido de vez para o Senba.

Foi bom e foi ruim. Bom, porque estava realizando aquilo que aprendera a gostar - ensinar. Ruim, porque perdi o contato direto com o pessoal da E & P.

Houve uma época em que o setor de geologia do Senba foi desativado e transferido, com todo o acervo, inclusive professores, para o Rio de Janeiro. Como nunca me agradou trabalhar no Rio - eu sempre dizia que o lugar mais longe de Fortaleza para mim seria Salvador -, fiquei. Porém, para ficar eu teria que acumular a cadeira de geologia de petróleo, além da de perfilagem, para os engenheiros dos cursos de perfuração, produção, química, etc., o que aparecesse. Topei.

Para me atualizar com as novidades em geologia, fiz mestrado na UFBA. Foi uma ótima ideia.

Ensinar a engenheiros me fez bem, porque eles me desafiavam com seus raciocínios analíticos. Como geólogo fui treinado em raciocínio lógico, comparativo, e a contemplar o meio ambiente para dele deduzir coisas do tipo - o presente é a chave do passado.

E topei, mais ainda, quando a Petrobras começou seus convênios com a UFBA, com a UFOP, com a UFPA e com a Universidade Agostinho Neto (Angola). Dei minha modesta contribuição a todas elas, e continuo a dar.

A vida acadêmica me fez bem. Antes, ainda na Petrobras, eu lidava com profissionais recém-formados, portanto empregados, todos bem vestidos e adequadamente comportados. Os bancos escolares e as brincadeiras estavam fora daquele ambiente de trabalho. Eles tinham que dar duro, porquanto ao concluírem o curso de pós-graduação em petróleo, a empresa lhes cobraria os gastos feitos com eles durante aquele ano.

Nas universidades os alunos são jovens. A maioria recém-saída da adolescência e um tanto irreverente, mas alegres, usa bermudas, camisetas, sandálias, ainda sem imaginar o que lhe espera lá fora.

Aposentado da Petrobras, não parei e continuei a pedalar a bicicleta da vida. Tornei-me

empresário da água subterrânea. Sai do preto para o branco, a lidar com as mesmas linhas e traçados caóticos que nos conduzem aos mistérios da perfilagem.

Esta modesta contribuição é para todos aqueles que, bem ou mal, aprenderam junto comigo, em salas de aula, em palestras, em congressos ou onde quer que nosso amigo perfil geofísico estivesse sendo discutido. A eles a minha homenagem e a minha gratidão, o meu carinho e o meu muito obrigado pela paciência que tiveram ao me escutar e ler.

Aos geólogos Rui Gomes da Silva e Walter Ohofugi, durante muito tempo companheiros de luta e aprendizado, o meu abraço cordial.

Sem o incentivo, a paciência e a ajuda dos professores Hédison Sato, Milton Porsani, Olivar Lima e da graduanda Odette Aragão, este livro não teria se concretizado.

Os agradecimentos finais vão para a Petrobras que me deu oportunidades, as quais tenho certeza que correspondi plenamente; à Cerb que por meio da Hydrolog cedeu exemplos de perfis; aos demais patrocinadores; e, em especial ao INCT-GP/CNPq, que me incentivou neste despretensioso livro, que nada mais é do que uma coletânea de tudo aquilo que fui acumulando – grande parte de domínio público – ao longo dos meus 50 anos de vida profissional e 40 de ensino.

Uma homenagem final a Gesualdo, Dalva, Francisco, Joaninha, Oséas, Rita, Simone, Mônica, Márcio e Mauro, presenças constantes em todos os meus dias.

Salvador, setembro de 2012

Sumário

Apresentação **5**

Prefácio **7**

Sumário **11**

Lista de Figuras **19**

Lista de Tabelas **23**

1 Introdução **25**

1.1 O Que é Perfil Geofísico de Poço? 26

1.2 Histórico 28

1.3 Correspondência entre os Registros e as Propriedades das Rochas 29

1.4 Aplicação dos Perfis Geofísicos em Poço Aberto 30

1.5 Utilização dos Perfis Geofísicos no Petróleo 30

1.6 O Meio Ambiente de uma Ferramenta de Perfilagem 31

1.6.1 Pressões em Subsuperfície 31

1.6.2 Fluido de Perfuração (Lama) 32

1.6.3 Invasão 32

1.6.4 Reboco 33

1.6.5 Geometria do Poço 34

1.6.6 Volume da Lama ou Diâmetro do Poço 34

1.6.7 Zoneamento Fluido Circunvizinho às Paredes do Poço 35

1.6.8 Zoneamento Fluido em Função do Tipo de Lama 35

1.6.9 Salinidade ou Resistividade da Lama 37

1.7 Uma Operação de Perfilagem 37

1.8 A Malha Gráfica API 38
1.9 Apresentação Final de um Perfil de Poço 39
1.9.1 Formatos dos Arquivos Digitalizados 40
1.10 Vantagens dos Perfis de Poços 41
1.11 Desvantagens dos Perfis de Poços 41
1.12 Principais Tipos de Perfis Geofísicos 42
1.13 Questionário 42
Referências 43

2 Propriedades Fundamentais das Rochas 45
2.1 Generalidades 45
2.2 Lei das Misturas 46
2.3 Teoria da Unicidade 46
2.4 Porosidade 46
2.5 Permeabilidade 47
2.6 Propriedades Petrofísicas 49
2.6.1 Propriedades Elétricas 49
2.7 Propriedades Acústicas 56
2.7.1 Propriedades Radioativas 57
2.8 Questionário 60
Referências 61

3 Perfil de Raios Gama 63
3.1 Generalidades 63
3.2 Energia e Características Físicas das Radiações 63
3.3 Absorção dos Raios Gama pela Matéria 64
3.4 Deposição dos Radioelementos 65
3.4.1 Rochas Radioativas 65
3.5 Princípio de Medição do Perfil de Raios Gama 66
3.6 Fatores que Afetam as Leituras dos Perfis de Raios Gama 67
3.6.1 Calibração de uma Ferramenta de Raios Gama 69
3.7 Interpretação do Perfil de Raios Gama Convencional - GR 69
3.7.1 Interpretação Qualitativa do Perfil Exemplo 70
3.7.2 Interpretação Quantitativa do Perfil Exemplo 71
3.8 Resumo do Perfil de Raios Gama Convencional (GR ou RG) 72
3.9 Raios Gama de Espectrometria 74
3.10 Questionário 74
Referências 75

4 Perfil do Potencial Espontâneo **77**
4.1 Potenciais Naturais em um Poço 77
4.1.1 Potencial Eletrocinético - E_{k} 77
4.1.2 Potencial de Junção de Líquidos - E_{j} 78
4.1.3 Potencial de Membrana - E_{m} 79
4.2 Potencial Espontâneo Estático - SSP 81
4.3 Efeitos Ambientais sobre a Curva do SP 82
4.3.1 Fatores que Afetam o Formato da Curva do SP 83
4.4 Qualidade da Curva do SP 84
4.5 Interpretação da Curva do SP 84
4.5.1 Leituras no Perfil Exemplo 85
4.5.2 Arquivos Digitalizados 86
4.6 Interpretação da Curva do SP na Presença de Sais Bivalentes 86
4.7 Resumo da Curva do SP 87
4.8 Questionário 88
Referências 89

5 Perfis com Eletrodos Galvânicos **91**
5.1 Introdução 91
5.2 Eletrodo em um Meio Homogêneo 92
5.3 Tipos de Perfis com Eletrodos Galvânicos 93
5.3.1 Sistemas Monoeletrodos 93
5.3.2 Sistemas Multieletrodos 95
5.4 Principais Sistemas Multieletrodos 96
5.4.1 Limitações dos Multieletrodos 96
5.4.2 Principais Usos dos Multieletrodos 97
5.4.3 Resumo do Macro Perfil Elétrico Convencional 97
5.5 Sistemas Elétricos Focalizados 98
5.5.1 Focalização da Corrente 98
5.5.2 Princípio da Medição dos Macros Lateroperfis 100
5.5.3 Usos dos Lateroperfis 100
5.6 Perfis de Micro Resistividades 101
5.6.1 Micro Perfil Elétrico 101
5.6.2 Limitações do Microperfil Elétrico 102
5.6.3 Interpretação Qualitativa do Micro Perfil 103

5.6.4 Apresentação do Micro Perfil 103
5.6.5 Micro Lateroperfil 104
5.6.6 Proximidade 104
5.6.7 Apresentação do Proximidade e Micro Lateroperfil 104
5.6.8 Micro Esférica Focalizada 105
5.6.9 Resumo das Condições Ideais dos Perfis de R_{xo} (MLL, PL, MSFL) . . 105
5.6.10 Utilização Prática da R_{xo} 106
5.6.11 Resumo das Ferramentas de Microrresistividade ou de R_{xo} 109
5.7 Questionário 110
Referências 111

6 Perfis de Indução 113
6.1 Introdução 113
6.2 Base Teórica do Perfil de Indução 113
6.2.1 Princípio de Funcionamento da Ferramenta de Indução 114
6.2.2 A Ferramenta de Indução Convencional 115
6.2.3 Calibração da Ferramenta 116
6.3 Teoria do Fator Geométrico de Doll 116
6.3.1 Fator Geométrico Radial 117
6.3.2 Fator Geométrico Vertical 118
6.4 Teoria de Moran & Kunz 118
6.4.1 Doll vs Moran & Kunz 119
6.5 Interpretação do Perfil de Indução 120
6.5.1 Erro Ferramental 120
6.6 Limitações do Perfil de Indução 121
6.6.1 Principais Usos do Perfil de Indução 122
6.7 Ferramentas Indutivas Atuais 122
6.8 Resumo dos Perfis de Indução 124
6.9 Questionário 124
Referências 125

7 Perfil Sônico **127**
7.1 Generalidades 127
7.2 Princípio da Medição do Tempo de Trânsito 127
7.2.1 Parâmetros Acústicos Mensuráveis 129
7.3 O Sônico como Determinante da Porosidade 129
7.3.1 Efeito da Ausência de Compactação sobre ϕ_s 130
7.3.2 Efeito da Porosidade Secundária 132
7.3.3 Efeito da Matriz 132
7.3.4 Efeito da Argilosidade (V_{sh}) 133
7.3.5 Efeito do Hidrocarboneto (Δt_{hc}) 133
7.3.6 Problemas Operacionais e Imprecisões das Leituras de ϕ_s 135
7.3.7 Integração do Tempo de Trânsito (*Travel Time Integrator*) 136
7.3.8 Equação de Raymer, Hunt & Gardner (1980) 137
7.4 Ondas Cisalhantes 138
7.5 Resumo do Perfil Sônico 138
7.6 Questionário 138
Referências 140

8 Perfil de Densidade **141**
8.1 Introdução 141
8.2 Princípio do Perfil de Densidade 142
8.3 Definição de Densidade Eletrônica 143
8.4 A Ferramenta Densidade Compensada 145
8.5 Interpretação do Perfil de Densidade 146
8.5.1 Efeito da Lama/Reboco 147
8.5.2 Efeito dos Hidrocarbonetos 148
8.5.3 Efeito da Argilosidade 149
8.6 Apresentação do Perfil de Densidade 149
8.7 Perfil Litodensidade 150
8.8 Resumo do Densidade 151
8.9 Questionário 151
Referências 152

9 Perfis Neutrônicos **153**
9.1 Introdução 153
9.2 Propriedades dos Nêutrons 153
9.3 Fontes de Nêutrons 153
9.4 Interação dos Nêutrons com a Matéria 154
9.4.1 Colisão 155
9.4.2 Amortecimento ou Espalhamento 156
9.4.3 Termalização 159
9.4.4 Captura (ou Absorção) 159
9.4.5 Absorvedores de Nêutrons Termais 160
9.5 Princípio das Ferramentas Neutrônicas 161
9.5.1 Neutrônico Omnidirecional 162
9.5.2 Neutrônico Epitermal 162
9.5.3 Neutrônico Termal 163
9.5.4 Duplo Neutrônico 163
9.6 Apresentação dos Perfis Neutrônicos 164
9.7 Interpretação dos Perfis Neutrônicos 164
9.8 Usos dos Perfis Neutrônicos 166
9.9 Resumo dos Perfis Neutrônicos 166
9.10 Questionário 166
Referências 167

10 Interpretação dos Perfis Geofísicos 1 **169**
10.1 Introdução 169
10.1.1 Cuidados com os Analógicos 171
10.2 Interpretação Qualitativa 172
10.2.1 Métodos *Quick Looks* de Interpretação 173
10.3 Interpretação Quantitativa 175
10.3.1 Dados que Devem ser observados *a priori* nos Cabeçalhos dos Perfis . 175
10.3.2 Critérios para a Realização das Leituras nos Perfis Analógicos 176
10.3.3 Parametrização das Equações 176
10.4 Interpretação Avançada dos Perfis 178
10.4.1 Determinação da Litologia 179
10.5 Questionário 182
Referências 183

11 Interpretação dos Perfis Geofísicos 2 **185**
11.1 A Argilosidade (V_{sh}) e os Perfis 185
11.1.1 Efeito V_{sh} sobre os Perfis de Resistividade 186
11.1.2 Efeito V_{sh} sobre os Perfis de Porosidade 187
11.2 Principais Indicadores de V_{sh} 188
11.3 Os Hidrocarbonetos e os Perfis 190
11.3.1 Efeito dos Hidrocarbonetos sobre o Densidade 192
11.3.2 Efeito dos Hidrocarbonetos sobre os Neutrônicos 192
11.3.3 Visualização dos Efeitos dos Hidrocarbonetos 193
11.3.4 Gráfico da *ASA* 194
11.3.5 Algoritmos do Gráfico $\phi_{\mathrm{D}} \times \phi_{\mathrm{N}}$ 195
11.3.6 Algoritmos do Gráfico da *Asa* 198
11.4 Questionário 198
Referências 199

12 Interpretação dos Perfis Geofísicos 3 **201**
12.1 A Condutividade das Rochas Argilosas 201
12.2 Equações Conceituais e Empíricas para as Rochas Argilosas 202
12.3 Interpretação Usando Planilhas de Cálculos 206
12.4 Passos Sequenciais de uma Planilha 207
12.4.1 Esclarecimentos importantes sobre o procedimento 208
12.5 Cálculo do *Net Pay* 209
12.6 Hidrocarbonetos em Reservatórios com Água Doce 209
12.7 Uso dos Perfis na Água Subterrânea 210
12.7.1 Exemplo de um Caso de Contaminação de Aquíferos 212
12.8 Questionário 213
Referências 214

Símbolos **217**

Currículo **221**

Lista de Figuras

1.1 Exemplo de rebocos de fluidos. Adaptada de Reid (2000). 34

1.2 Zoneamento Fluido Radial ao Poço. 35

1.3 Perfis de invasão para um fluido de perfuração a base de água. Adaptada de Glover (2007). 36

1.4 Perfis de invasão para um fluido de perfuração a base de óleo. Adaptada de Glover (2007). 36

1.5 Unidade de Perfilagem - Caminhão Laboratório. 37

1.6 Componentes principais para uma operação de perfilagem geofísica. 38

1.7 Curvas de perfis inscritas em malha tipo API. 39

2.1 Modelo geológico de rocha porosa. 49

2.2 Comportamento esquemático das condutividades em rocha limpa e argilosa. Adaptada de Worthington (1985). 55

2.3 Gráfico de Waxman & Smits (1968) usando dados de Hill & Milburn (1956). 56

3.1 Correlação entre uma curva de raios gama e seus fotogramas. 63

3.2 Exemplo de perfil composto. 70

3.3 Definição de ambientes sedimentares com o uso do perfil de Raios Gama (adaptada de Glover, 2007). 70

3.4 Compilação de equações não lineares de argilosidade e seus respectivos autores. 71

3.5 Curvas Raios Gama em área altamente radioativa. 73

3.6 Curvas de Raios Gama em poço aberto (OH) e após revestido em aço (CH). . 73

3.7 Gráfico para escolha do GR_{max} e GR_{min} do poço 1. 75

3.8 Gráfico para escolha do GR_{max} e GR_{min} do poço 2. 76

3.9 Gráfico para escolha do GR_{max} e GR_{min} do poço 3. 76

4.1 Curvas do SP obtidas em um mesmo poço e em datas distintas. 79

4.2 Atividade do Na^+ versus resistividade das soluções de NaCl (Schlumberger, 1989). 80
4.3 O SP é a medida entre o eletrodo móvel e um fixo na superfície (SP = ir_m) (Adaptada de Hallenburg, 1983). 82
4.4 Perfil SP exemplo para cálculo do R_w. 85

5.1 Princípio da medição do perfil elétrico. A é o eletrodo de corrente e B, o de retorno (Guyod, 1944). 92
5.2 Esferas equipotenciais vizinhas a um eletrodo em meio homogêneo e isotrópico. 93
5.3 Arranjo dos eletrodos dos Sistemas Normais. 95
5.4 Arranjo dos eletrodos do Sistema Lateral. 95
5.5 Exemplo de Perfil Elétrico Multieletrodo Convencional. 97
5.6 Arranjo de eletrodos cilíndricos LL-3 (Schlumberger, 1989). 99
5.7 Arranjo de eletrodos do Duplo Lateroperfil (Schlumberger, 1989). 99
5.8 Esquema do Micro Perfil Elétrico. 101
5.9 Exemplo de Micro Perfil elétrico com Cáliper de dois braços. 103
5.10 Patins das ferramentas do Micro Lateroperfil e Proximidade. Adaptada de Glover (2007). 104
5.11 Patim da ferramenta Micro Esférica Focalizada (Schlumberger, 1989). 105
5.12 Modelo do MOP mostrando uma camada permoporosa antes e após a invasão. 106

6.1 Diferenças de fases observadas em um sistema de bobinas do perfil de Indução. Adaptada de Serra (1984). 115
6.2 Arranjo de bobinas 6FF40 coaxiais ao poço (Dresser-Atlas, 1973). 115
6.3 Posicionamento espacial de anéis condutores em relação a duas bobinas. 118
6.4 Exemplo de Perfil de Indução. 122

7.1 Trem de ondas no osciloscópio do Sônico e suas aplicações petrofísicas. 128
7.2 Esquema de uma ferramenta sônica com um Transmissor e dois Receptores. . 128
7.3 Exemplo de corpos de folhelhos não compactados com $\Delta t_{sh} > 100$ μs/pé. . . 131
7.4 Modelo teórico de uma mistura de duas matrizes e água. 132
7.5 Modelo clássico das porosidades total e efetiva. 133
7.6 Modelo de uma camada limpa portadora de óleo. 134
7.7 Perfil Sônico BHC mostrando o resultado da integração do tempo (ITT), à esquerda da segunda faixa. 136

8.1 Uma fonte de 0,662 MeV tem como limite mínimo de energia defletida 0,288 MeV. 142

8.2 Transformada do perfil de densidade $\rho_e = 1{,}0704\rho_{eLS} - 0{,}1883$ (Schlumberger, 1985). 144
8.3 Carta para correção do Efeito Z/A (Schlumberger, 1985). 145
8.4 Ferramenta do Densidade Compensada pelo efeito do poço. Adaptada de Schlumberger, 1985. 145
8.5 Porcentual da informação da densidade compensada com a distância da parede do poço. Adaptada de Glover, 2007. 146
8.6 Exemplo de perfil de Densidade Compensada. 146
8.7 O gráfico Spine & Ribs mostra o efeito dos rebocos leves ou pesados (Schlumberger, 1985). 147

9.1 Zoneamento energético dos nêutrons após a saída de uma fonte omnidirecional. 158
9.2 A diminuição da concentração de nêutrons termais independe da porosidade da rocha. Adaptada de Ellis (1987). 160
9.3 Comparação entre as porosidades sônica, densidade e neutrônica, em zona com água. 165
9.4 Zona com HC e água de acordo com as curvas do perfil de Densidade e do Neutrônico. 165

10.1 Variação da qualidade das curvas com o tempo. 172
10.2 Exemplo de dois intervalos com alta resistividade intercalados por folhelhos de diferentes propriedades radioativas. 173
10.3 Gráfico para escolha dos parâmetros GR_{max} e GR_{min}, usando o perfil da Figura 9.4. 177
10.4 Gráfico para escolha dos parâmetros dos folhelhos (ϕ_{Dsh}, ϕ_{Nsh}), usando o perfil da Figura 9.4. 178
10.5 Geometria dos ambientes sedimentares para definição exploratória. Adaptada de Bjorlykke, 1989. 178
10.6 Curva de Raios Gama e os ambientes deposicionais. Adaptada de Glover (2007). 179
10.7 Exemplo do *Hingle plot* para definição de parâmetros litológicos. 180
10.8 Exemplo de gráfico da Schlumberger para definição da porosidade e da litologia. 181
10.9 Poço em minério de ferro, com eletrofácies modeladas segundo o método do KNN (Soares et al, 2009). 182

11.1 Distribuição dos três tipos de folhelhos dentro do modelo de rocha da perfilagem. 185
11.2 Gráfico ϕD vs ϕN mostrando o comportamento dos três tipos de folhelhos em relação à porosidade (Schlumberger, 1985). 186

11.3 Duas camadas de águas (livre e adsorvida) dão origem à condução em paralelo em uma rocha arenoargilosa. 186
11.4 Modelo de rocha com folhelho interlaminado. 187
11.5 Definição de ϕ e V_{sh} conforme os laboratórios e perfis Densidade e Neutrônicos (adaptado de Eslinger & Pevear, 1988). 188
11.6 Confecção de um gráfico $\phi_{\mathrm{D}} \times \phi_{\mathrm{N}}$. 189
11.7 Modelo de rocha limpa com hidrocarboneto. 192
11.8 Perfil RG/Densidade/Neutrônico, mostrando o comportamento de camadas com folhelhos ($\phi_{\mathrm{Nsh}} < \phi_{\mathrm{Dsh}}$), água ou óleo. 193
11.9 Gráfico da *asa* para a interpretação dos perfis. Adaptado da Schlumberger (1973). 194
11.10 Definição das retas traçadas no gráfico. 196
11.11 Dedução da Equação da porosidade Gaymard. 198

12.1 Gráfico da tendência convexa das areias argilosas (Lima et al, 2005). 201
12.2 Modelo unitário de Poupon, Loy & Tixier (1954). 203
12.3 Amplitude de uso das equações de S_{w} (Adaptado de Worthington, 1995). . . . 205
12.4 Comparação entre dois modelos de equação de S_{w} (Ramos, 1990). 206
12.5 Intervalos de interesse e seus parâmetros para o cálculo do *Net Pay*. 209
12.6 Perfil de aquisição (esquerda) e computado (direita) para orientação da escolha de profundidades ideais para a colocação de filtros (cortesia Cerb/Hydrolog). 212
12.7 Pluma contaminante (Palma, 2004). 213
12.8 Determinação do parâmetro *cutoff* de S_{w} (Mendes, 2007). 214
12.9 Determinação do parâmetro *cutoff* de V_{sh} (Mendes, 2007). 214
12.10 Determinação do parâmetro *cutoff* de ϕ (Mendes, 2007). 214

Lista de Tabelas

1.1 Exemplo de cálculo do VOR. Dados estimados de A, h, ϕ e S_w, considerando-se $B_o = 1{,}3$ e FR = 25 %. 31

1.2 Exemplo de arquivo LAS. 41

1.3 Análises hidroquímicas das águas de um poço no tempo. 43

2.1 A Lei das Misturas aplicada a uma combinação de quatro minerais volumetricamente distintos resulta em quatro respostas físicas idênticas (densidades) a gerar ambiguidades interpretativas. 47

2.2 Valores laboratoriais petrofísicos para vários tipos litoambientais (Elias et al, 2000). 53

2.3 Contribuição relativa dos três principais elementos radioativos naturais em um fluxo radioativo (Adams & Weaver, 1958). 60

4.1 Planilha para cálculo do R_{wSP}, preenchida com o dado digitalizado do SP. Acima os parâmetros (constantes) e abaixo, os dados (leituras e resultados). . 87

5.1 Cálculos efetuados com a Equação 5.11 mostram que existe uma diferença de apenas 8,3V (90%) entre o eletrodo e uma esfera equipotencial localizada no infinito elétrico. 94

5.2 Condições ideais para a obtenção de R_{xo}, com as ferramentas MLL, PL e MSFL (dados extraídos de Schlumberger (1984). 106

6.1 Cálculo do erro de uma ferramenta indutiva, de primeira geração. 121

6.2 Cálculo do erro de uma ferramenta indutiva, de última geração. 121

7.1 Diferenças entre as resoluções do Sônico e a Sísmica. 137

8.1 Valores da constante C para os elementos mais comuns das rochas sedimentares (Schlumberger, 1985). 143

8.2 Comparação entre as densidades de laboratório (ρ_{LAB}), eletrônica (ρ_{e}) e a registrada no perfil de Densidade (ρ_{perfil}) (Schlumberger, 1985). 144

9.1 Características dos principais componentes do átomo. 154
9.2 Interação dos nêutrons com alguns elementos das rochas, de acordo com a sua secção eficaz de espalhamento e captura. Adaptada da Schlumberger, 1973. . 158
9.3 Espectro de emissão dos raios gama de captura para alguns elementos das rochas (Schlumberger, 1973). 159
9.4 Tipos de ferramentas neutrônicas, de acordo com suas detecções. 161

10.1 Usos e problemas dos principais perfis para uma interpretação básica na indústria do petróleo. 170
10.2 Planilha de cálculos para o método do R_{wA} Mínimo. 175

11.1 Principais indicadores de argilosidade obtidos com dados dos perfis. 191