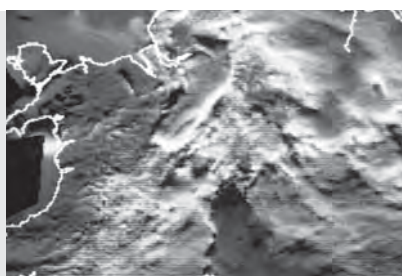


GEOFÍSICA de exploração

Philip Kearey | Michael Brooks | Ian Hill

tradução | Maria Cristina Moreira Coelho

oficina de textos



GEOFÍSICA de exploração

Philip Kearey | Michael Brooks | Ian Hill

tradução | Maria Cristina Moreira Coelho

Copyright original © 2002 by Blackwell Science Ltd, a Blackwell Publishing Company, UK
Copyright da tradução em português © 2009 Oficina de Textos

Capa e projeto gráfico MALU VALLIM
Diagramação CASA EDITORIAL MALUHY & Co.
Preparação de figuras DOUGLAS DA ROCHA YOSHIDA
Revisão técnica ADALBERTO DA SILVA
Revisão de textos GERSON SILVA
Tradução MARIA CRISTINA MOREIRA COELHO

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Kearey, Philip

Geofísica de exploração / Philip Kearey,
Michael Brooks, Ian Hill ; tradução Maria
Cristina Moreira Coelho. – São Paulo : Oficina de Textos, 2009.

Título original: An introduction to geophysical exploration

Bibliografia

ISBN 978-85-86238-91-8

1. Geologia 2. Prospecção - Métodos geofísicos
I. Brooks, Michael. II. Hill, Ian. III. Título.

09-06213

CDD-622.15

Índices para catálogo sistemático:

1. Geofísica da exploração : Mineração 622.15

Todos os direitos reservados à Oficina de Textos
Trav. Dr. Luiz Ribeiro de Mendonça, 4
CEP 01420-040 São Paulo-SP - Brasil
tel. (11) 3085 7933 fax (11) 3083 0849
site: www.ofitexto.com.br e-mail: ofitexto@ofitexto.com.br

Apresentação

Os estudantes, professores e profissionais de geofísica no Brasil sempre estudaram os métodos geofísicos por apostilas de cursos e livros em outros idiomas. Ainda não se dispunha de um livro em português que abrangesse todos os métodos geofísicos para auxiliar esses estudantes e profissionais a seguir a carreira de geofísico.

O livro *Geofísica de Exploração*, em tradução para o português, tem como objetivo suprir a deficiência de material didático na área de exploração geofísica, que vem crescendo muito nos últimos 20 anos. A leitura deste livro é indicada principalmente a profissionais da área de geofísica aplicada, bem como a alunos dos cursos de Geofísica e Física. Este material é uma excelente referência em todas as áreas de geofísica aplicada, para professores e profissionais atuantes.

Neste volume são abordados vários métodos geofísicos, como sísmica de reflexão e refração, eletromagnéticos, gravimétricos e de poços. Contém tanto a carga teórica de que o aluno pode precisar para consulta, quanto exercícios que fornecerão a ele a confiança na aplicação das técnicas geofísicas nas áreas de aquisição, processamento e interpretação de dados.

A tradutora não poupou esforços em adequar os termos técnicos do inglês para o português, que podem, a partir daqui, ser cada vez mais consagrados e utilizados entre os profissionais de geofísica brasileiros.

Estou certo de que o empenho e a dedicação investidos pelos autores em anos de trabalho árduo certamente foram compensados.

Ganhamos todos: os estudantes, os professores, os profissionais, as empresas e as instituições de geofísica brasileiras.

Marcos Antônio Gallotti Guimarães
Geonunes

Prefácio

à edição brasileira

O livro Geofísica de Exploração, de Kearey, Brooks e Hill, agora em sua primeira edição em português, é um texto básico clássico de Geofísica, adotado em inúmeras escolas mundo afora e que vem ocupar um espaço importante no contexto brasileiro em particular, e dos países lusófonos em geral, pela escassez de literatura técnica específica em nossa língua.

A tradução baseou-se em sua terceira edição, do ano de 2002, que contou com a participação de Ian Hill, ausente nas versões anteriores, o qual contribuiu para a ampliação do conteúdo e dos temas tratados na obra. Infelizmente, também representou a última edição revista por Philip Kearey, que faleceu no ano seguinte, aos 55 anos de idade.

Este livro é destinado a todos os estudantes e profissionais de áreas técnicas e científicas que, de um modo ou de outro, utilizam aplicações geofísicas em seu trabalho. Evidentemente, os geocientistas encabeçam essa lista de usuários e executores, mas diversas áreas, que abrangem desde a Arqueologia até as Engenharias, passando pela Física e pela Matemática, compõem esse conjunto de interessados nos assuntos aqui tratados.

A recente expansão dos cursos de graduação em Geofísica no país e o crescente interesse na área, impulsionado pela indústria do petróleo e pelas aplicações ambientais, demonstram a propriedade em editar este livro. Para os alunos de graduação e pós-graduação, é um texto introdutório que cobre adequadamente os principais temas da Geofísica de Exploração; para os profissionais que atuam nessa área, é um livro de consulta ágil e abrangente.

Como se trata de um campo do conhecimento que tem suas bases e aplicações fundadas na multidisciplinaridade, há sempre o risco de, por um lado, afugentar os leitores cujo domínio em Matemática ainda é

pouco desenvolvido e, por outro, provocar a sensação de incompletude naqueles mais afeitos aos procedimentos comuns ao Cálculo. Contudo, essa armadilha foi habilmente desarmada por Kearey e seus coautores, simplesmente não cedendo às simplificações que comprometem o conteúdo e apoiando a introdução dessas ferramentas em um contexto conceitual e qualitativo de fácil apreensão. Essa estratégia resultou em um texto que, ao mesmo tempo que atrai os leitores para seu desenvolvimento nas peculiaridades matemáticas, introduz a todos o cenário geológico no qual a aquisição geofísica é praticada.

Grande parte do livro é dedicada ao método sísmico, uma vez que ele é, ainda hoje, a ferramenta geofísica mais difundida e que envolve a maioria dos profissionais da área. Entretanto, cada um dos métodos geofísicos principais são tratados ao longo dos capítulos, mostrando um quadro abrangente da atividade exploratória.

Cabe destacar a organização adotada pelos autores, a qual, logo de início, estabelece os princípios e a discussão fundamental que permeiam e embasam a aquisição geofísica: a natureza do objeto de estudo e a ambiguidade intrínseca aos seus métodos de investigação. Imediatamente, ao contrário de muitos livros que normalmente mostram o tratamento de dados geofísicos de maneira compartimentada para cada método específico, o livro segue com uma revisão desse aspecto fundamental, aplicando a ótica do tratamento de sinais, demonstrando a universalidade dessa metodologia no estudo e na investigação dos fenômenos naturais que são objeto da Geofísica.

A leitura dos dois capítulos iniciais deste livro já mostrará aos usuários a riqueza de aplicações e explicará o encantamento que a Geofísica exerce sobre cada um que pretende se dedicar ao seu exercício. E, certamente, o leitor não irá resistir à compulsão de acompanhar até o fim o roteiro elaborado por Kearey, Brooks e Hill, revisitando-o inúmeras vezes como um livro de consulta ao longo da sua vida profissional.

Adalberto da Silva
Universidade Federal Fluminense

Prefácio

Este livro apresenta uma introdução geral aos métodos mais importantes de exploração geofísica. Esses métodos representam a principal ferramenta para investigação de subsuperfície e são aplicáveis a uma grande variedade de problemas. Embora sua principal aplicação ocorra em prospecção de recursos naturais, são também utilizados, por exemplo, como um auxílio à pesquisa geológica, como um meio de obter informações a respeito das propriedades físicas internas da Terra, no campo das investigações arqueológicas e naquelas voltadas à engenharia. Consequentemente, a exploração geofísica é importante não somente para geofísicos, mas também para geólogos, físicos, engenheiros e arqueólogos. O livro abrange os princípios físicos, a metodologia, os procedimentos de interpretação e os campos de aplicação dos vários métodos de aquisição. A ênfase principal foi colocada nos métodos sísmicos porque estes representam as técnicas mais largamente utilizadas, sendo empregados ampla e rotineiramente pela indústria de petróleo na prospecção de hidrocarbonetos. Como este é um texto introdutório, não tentamos esgotar completamente o assunto. Os leitores que necessitarem de informações adicionais sobre quaisquer dos métodos descritos devem se reportar aos textos mais avançados listados ao final de cada capítulo.

Esperamos que o livro sirva como texto para um curso introdutório para estudantes das disciplinas acima descritas e também como um guia útil para especialistas que estejam cientes do valor da aquisição geofísica para suas próprias disciplinas. Na preparação de um livro para esse leque de possíveis leitores, é inevitável o surgimento de problemas relativos ao nível de tratamento matemático a ser adotado. A geofísica é um tema altamente matemático e, embora tenhamos tentado mostrar que nenhum grande conhecimento matemático é necessário para uma compreensão geral da aquisição geofísica, uma completa compreensão das técnicas mais avançadas de processamento e interpretação de dados requer uma habilidade matemática considerável. Abordamos esse problema mantendo a matemática tão simples quanto possível e restringindo a

análise matemática completa a casos relativamente simples. Entretanto, consideramos importante que qualquer usuário de levantamentos geofísicos deva estar a par das técnicas mais avançadas de análise e interpretação de dados geofísicos, uma vez que elas podem aumentar consideravelmente a quantidade de informações úteis obtidas a partir desses mesmos dados. Na discussão de tais técnicas foi adotada uma abordagem semiquantitativa ou qualitativa, o que permite ao leitor avaliá-las em toda a sua extensão e importância sem entrar nos detalhes de sua implementação.

As edições anteriores deste livro foram adotadas como livro-texto padrão em exploração geofísica por numerosas instituições educacionais superiores na Grã-Bretanha, América do Norte e em muitos outros países. Nesta terceira edição o conteúdo foi atualizado, levando em conta os recentes desenvolvimentos nas principais áreas da exploração geofísica. Nós estendemos a abrangência dos capítulos de sísmica, incluindo novos materiais sobre sismologia de três componentes e sísmica de reflexão 4D, apresentando também uma nova seção sobre tomografia sísmica. Ampliamos também o leque de aplicações de sismologia de refração para incluir o relato de uma investigação voltada para a engenharia de fundações.

2. Uma característica menos conhecida do sal é sua suscetibilidade magnética negativa, detalhada no Cap. 7. Essa propriedade do sal causa uma redução local da força do campo magnético da Terra nas vizinhanças do domo de sal. A Fig. 1.2 apresenta um mapa de contorno da intensidade do campo magnético sobre o domo de sal Grand Saline, cobrindo a mesma área que a Fig. 1.1. As leituras foram corrigidas para compensar as variações do campo magnético em escala regional e efeitos decorrentes de variações do campo magnético com o tempo, de tal forma que, novamente, os contornos refletem apenas as variações nas propriedades magnéticas da subsuperfície. Como já esperado, o domo de sal está associado a uma

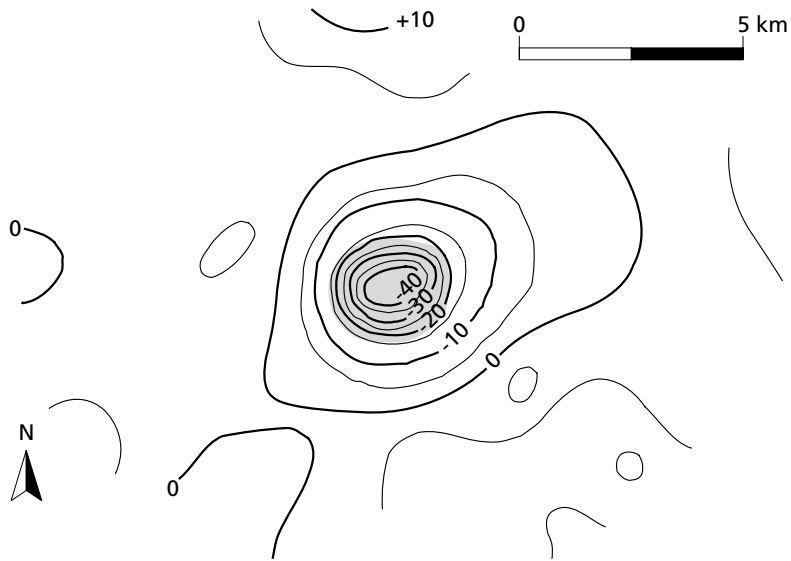


Fig. 1.1 A anomalia de gravidade sobre o domo de sal Grand Saline, Texas, EUA (contornos em unidades gravimétricas – ver Cap. 6). A área hachurada representa a expressão em subsuperfície do domo. (Modificada de Peters & Dugan, 1945)

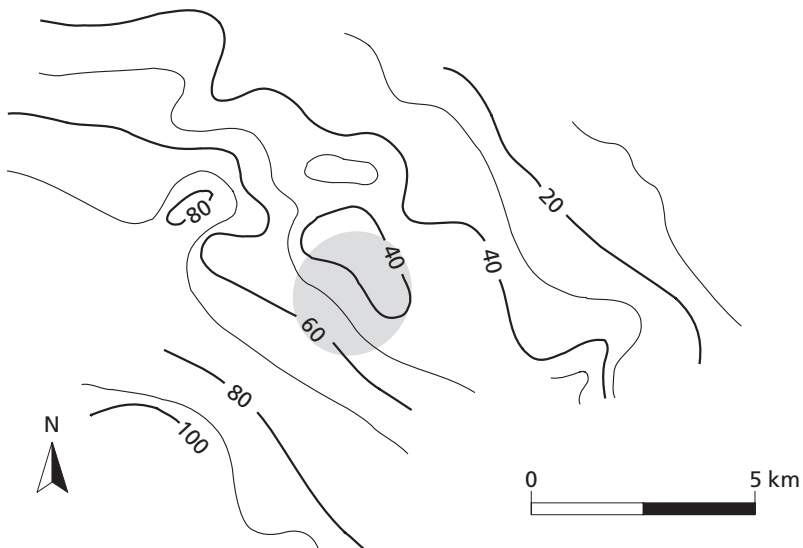


Fig. 1.2 Anomalias magnéticas sobre o domo de sal Grand Saline, Texas, EUA (contornos em nT – ver Cap. 7). A área hachurada representa a expressão em subsuperfície do domo. (Modificada de Peters & Dugan, 1945)

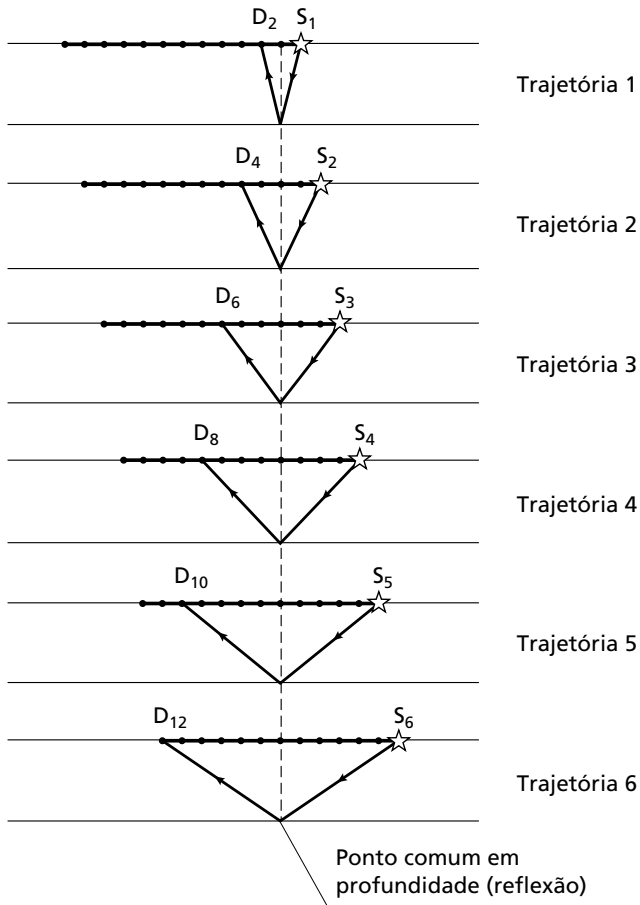


Fig. 4.14 Procedimento de campo para a obtenção de uma cobertura CDP de multiplicidade 6, com um lanço lateral de 12 canais detectores movido progressivamente ao longo da linha de aquisição

mesmo ponto num refletor de subsuperfície, a cobertura da aquisição é chamada de *cobertura simples* (*single-fold*). Cada traço sísmico representa, então, uma única amostragem de algum ponto sobre o refletor. Em aquisição de ponto médio comum (CMP), que se tornou o método padrão de aquisição sísmica multicanal bidimensional, convencionou-se que um conjunto de traços registrados em diferentes afastamentos contém reflexões de um ponto comum em profundidade (CDP) sobre o refletor (Fig. 4.14).

A *cobertura* ou *multiplicidade (fold) do empilhamento* refere-se ao número de traços na família CMP e, convencionalmente, é de 24, 30, 60 ou, excepcionalmente, acima de 1.000. A multiplicidade é também expressa em porcentagem: cobertura simples (*single-fold*) = 100% de cobertura, multiplicidade 6 (*six-fold*) = 600% de cobertura, e assim por diante. A cobertura de um perfil CMP é determinada por $N/2n$, onde N é o número de arranjos de geofones ao longo de um lanço e n é o número de intervalos entre arranjos de geofones segundo o qual o lanço é movido adiante entre

de velocidade sísmica independentes. Todavia, a perfilagem monocanal frequentemente fornece uma boa imagem da geologia de subsuperfície e permite estimar a profundidade e a geometria do refletor, as quais são suficientemente precisas para muitos usos.

As seções registradas sofrem com a presença de reflexões múltiplas, especialmente múltiplas de reflexão do fundo marinho, o que pode obliterar os eventos de reflexão primária nas partes inferiores do registro. Múltiplas são um problema particularmente importante nos levantamentos em águas muito rasas, uma vez que elas ocorrem a intervalos de tempo curtos após os eventos primários (Fig. 4.56). As seções registradas são frequentemente difíceis de interpretar em áreas de geometria de refletor complexa, por causa da presença de efeitos gravata-borboleta, eventos de difração e outras características de seções sísmicas não migradas.

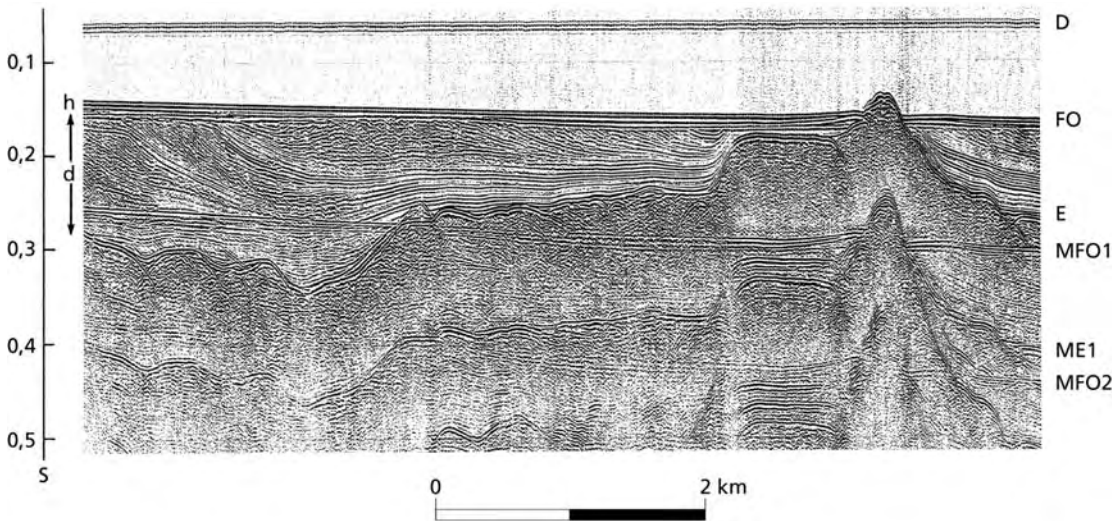


Fig. 4.56 Registro de canhão de ar do Golfo de Patras, Grécia, mostrando sedimentos hemipelágicos do Holoceno (h) e deltaicos (D) recobrendo uma superfície de erosão irregular (embasamento, E) em meio a rochas mesozoicas e terciárias tectonizadas do cinturão orogênico Hellenide (Alpino). FO = reflexão do fundo oceânico; MF01 e MF02 = primeira e segunda múltiplas da reflexão do fundo oceânico; ME1 = primeira múltipla da reflexão do embasamento

4.15.1 Fontes para sísmica marinha rasa

Como discutido no Cap. 3, há uma certa variedade de fontes marinhas sísmicas/acústicas operando em diferentes níveis de energia e caracterizadas por diferentes frequências dominantes. Consequentemente, pela seleção de uma fonte apropriada, a perfilagem monocanal pode ser aplicada a uma ampla gama de investigações marinhas, desde levantamentos de alta resolução de camadas sedimentares próximas à superfície a levantamentos de estruturas geológicas profundas. Em geral, há um compromisso entre

(p.ex. Brooks et al., 1984). Levantamentos especificamente projetados para o estudo conjunto de eventos refratados e de reflexão de grande ângulo são frequentemente chamados de *levantamentos de grande ângulo* (*wide-angle surveys*).

5.8.2 Programa de registro

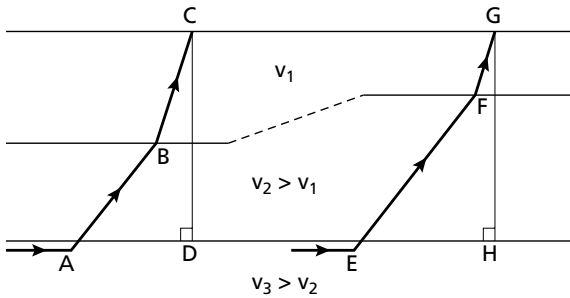


Fig. 5.17 Variação no tempo de percurso de uma onda frontal associada à variação da espessura da camada superficial

Para o completo mapeamento de refratores sob uma linha sísmica, é importante fazer com que as chegadas de ondas frontais de todos os refratores de interesse sejam obtidas pela mesma porção da linha. A importância disso pode ser observada na Fig. 5.17, na qual é mostrado que a mudança na espessura de uma camada superficial de baixa velocidade causaria uma mudança no atraso associado às chegadas de um refrator mais profundo,

o que pode ser erroneamente interpretado como uma mudança na profundidade do refrator. A geometria real de um refrator raso deve ser mapeada por meio de perfis reversos mais curtos ao longo da extensão do perfil principal. Estes são projetados para assegurar que as ondas frontais do refrator raso sejam registradas em posições onde a determinação da profundidade do refrator basal seja necessária. O conhecimento da distribuição de um refrator raso derivado dos perfis mais curtos permitiria, então, a correção dos tempos de percurso das chegadas provindas do refrator mais profundo.

O projeto geral requerido é a formulação de um programa de observação global, como ilustrado na Fig. 5.18. Tal esquema pode incluir tiros laterais em linhas individuais de perfil reverso, uma vez que os lanços laterais aumentam o comprimento de refrator atravessado por ondas frontais registradas e fornecem melhor compreensão das causas estruturais de quaisquer combinações observadas nas curvas tempo \times distância. A seleção do espaçamento entre os detectores de uma linha de perfil individual é determinada pelo detalhamento necessário da geometria do refrator, o intervalo de amostragem de pontos de interpretação do refrator sendo aproximadamente igual ao espaçamento entre detectores. Assim, a resolução horizontal do método é equivalente ao espaçamento entre detectores.

É frequente que não se disponha do número suficiente de detectores para cobrir todo o comprimento do perfil com o espaçamento desejado. Nesse caso, o procedimento é dispô-los de forma a cobrir um segmento da linha, segundo o espaçamento requerido e, então, disparar tiros em todos os

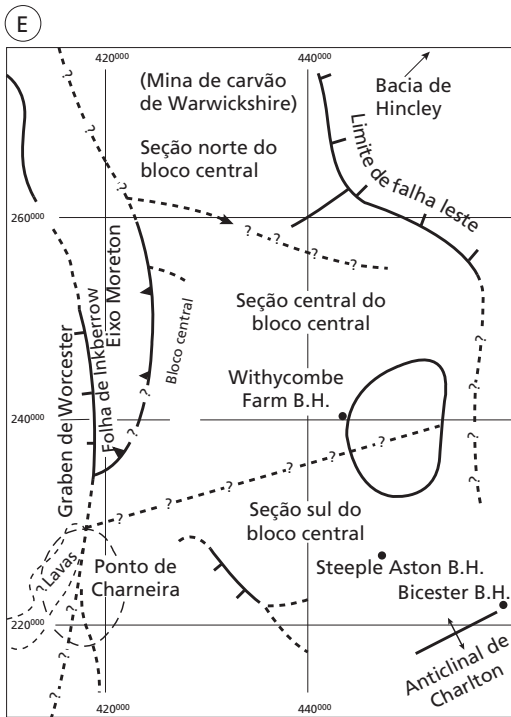


Fig. 7.17 (E) Interpretação geológica. A retícula é composta por quadrados de 10 km × 10 km. (Baseado em Reid et al., 1990)

mente válida para corpos de minério altamente magnéticos, cuja direção de magnetização tende a se alinhar ao seu comprimento (Fig. 7.18). Em tais casos, a anomalia é calculada pela soma dos efeitos de ambos os polos nos pontos de observação empregando-se as Eqs. 7.10, 7.11 e 7.9. Corpos magnéticos mais complicados, entretanto, requerem uma abordagem diferente.

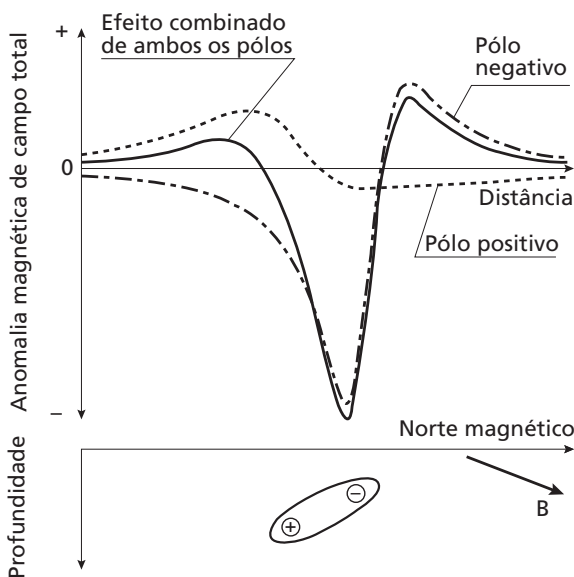


Fig. 7.18 A anomalia magnética de campo total de um corpo alongado aproximado por um dipolo

O campo aeromagnético mostrado na Fig. 7.17A tem as soluções mostradas na Fig. 7.17B-D para índices estruturais (N) de 0,0, 0,5 e 0,6, respectivamente. Os limites inferidos pelas soluções foram usados para construir a interpretação mostrada na Fig. 7.17E.

7.10.3 Interpretação indireta

A interpretação indireta de anomalias magnéticas é similar à interpretação gravimétrica, no sentido de que é feita uma tentativa de igualar a anomalia observada à calculada por um modelo, por meio de ajustes iterativos. Anomalias magnéticas simples podem ser simuladas por um único dipolo. Essa aproximação da resposta magnética de um corpo geológico real é frequente-

A anomalia magnética da maior parte dos corpos de forma regular pode ser calculada como o efeito combinado de uma série de dipolos paralelos à direção de magnetização (Fig. 7.19). Os polos dos magnetos são negativos na superfície do corpo onde o vetor magnetização entra no corpo, e positivo onde ele sai do corpo. Assim, qualquer corpo uniformemente magnetizado pode ser representado por um conjunto de polos magnéticos distribuídos sobre sua superfície. Considere um desses magnetos elementares de comprimento l e seção transversal δA , num corpo com intensidade de magnetização J e momento magnético M . Da Eq. 7.5

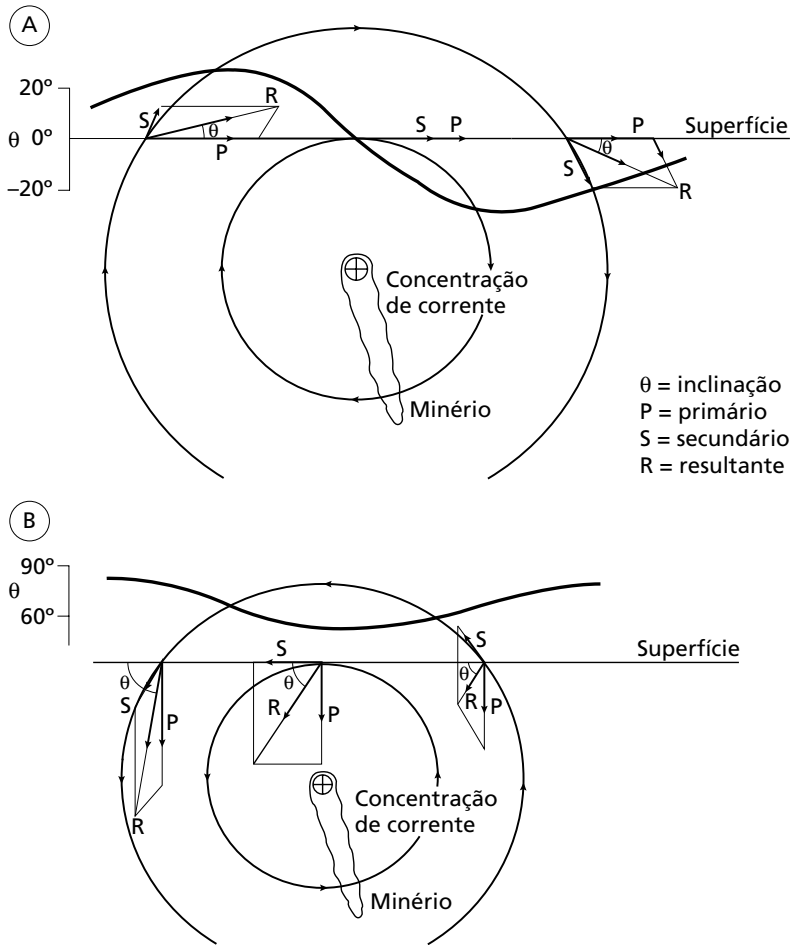


Fig. 9.4 Perfis de ângulo de inclinação resultantes de bobinas transmissoras (A) vertical e (B) horizontal. (Baseado em Parasnis, 1973)

cruzamento onde o ângulo de inclinação é zero, já que aqui, ambos os campos, primário e secundário, são horizontais. Quando o transmissor fixo é horizontal, o campo primário é vertical (Fig. 9.4B) e o corpo estará localizado onde a inclinação for mínima. Um exemplo do uso de métodos de ângulo de inclinação (transmissor vertical) na localização de um corpo maciço de sulfeto é apresentado na Fig. 9.5.

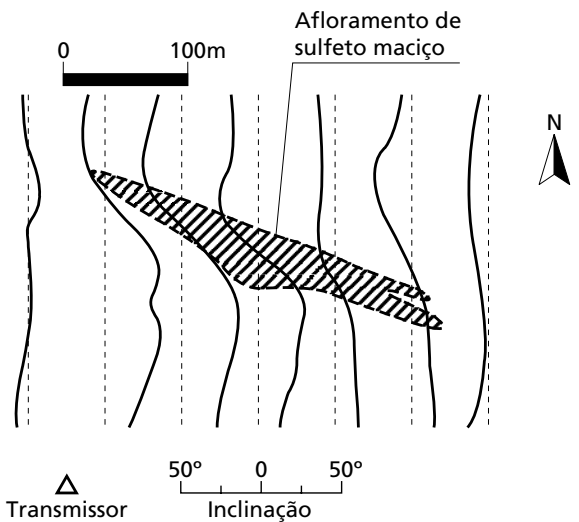


Fig. 9.5 Exemplo de levantamento de ângulo de inclinação usando um transmissor de bobina vertical (Baseado em Parasnis, 1973)

Se o condutor estiver próximo à superfície, tanto a amplitude quanto os gradientes do perfil de ângulo de inclinação serão grandes. Esses valores diminuem conforme a profundidade do condutor aumenta e podem, conseqüentemente, ser usados para se obter estimativas semiquantitativas da profundidade