

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ASTRONOMIA GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
CURSO PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

TESE DE DOUTORADO

MODELAGEM E INVERSÃO DE DADOS DE
POTENCIAL ELETROKINÉTICO

SUZAN SOUSA DE VASCONCELOS

São Paulo – Brasil

Fevereiro – 2014

Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia Geofísica e Ciências Atmosféricas
Programa de Pós-Graduação em Geofísica

Modelagem e Inversão de dados de Potencial Eletrocinético

por SUZAN SOUSA DE VASCONCELOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica, do Instituto de Astronomia Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Comissão Examinadora

_____ Prof. Dr. Carlos A. Mendonça - Orientador/IAG/USP
_____ Prof. Dr. Vagner Roberto Elis- IAG/USP
_____ Prof. Dr. Darcicléa Ferreira Santos - UFPA
_____ Prof. Dr. Valéria Cristina Ferreira Barbosa - ON
_____ Prof. Dr. Fernando Sérgio de Moraes - UENF/RJ

Data de defesa: 26/02/2014

RESUMO

Estudos teóricos sugerem que sinais geofísicos de potencial espontâneo, gerados em testes de bombeamento em aquíferos ou poços de produção (água ou petróleo), podem ser utilizados para caracterizar o meio geológico na vizinhança dos poços. Esta possibilidade mostra-se viável pois distorções no potencial elétrico associadas ao fluxo da água são induzidas em locais estratégicos do meio, a saber: nas terminações de bombeamento e no contato entre unidades ou heterogeneidades do meio. Em meios homogêneos prevê-se uma equivalência entre parâmetros de bombeamento e termos de corrente que geram a anomalia de potencial espontâneo. Esta propriedade não tem sido explorada experimentalmente apesar de promissora como critério para aferir a homogeneidade do meio e determinar parâmetros físicos do substrato. Nosso estudo desenvolve experimentos de laboratório simulando testes de bombeamento que mostram a correspondência entre fontes hidráulicas e elétricas em meios homogêneos e distorções causadas por heterogeneidades. Os dados experimentais são analisados com modelagem numérica por elementos finitos, simulando fluxos acoplados com transporte de água e carga elétrica em testes de bombeamento. A partir da relação de equivalência desenvolvemos procedimentos para caracterizar o ambiente ao redor de poços e localizar feições que afetam a circulação de água. Para aprimorar o imageamento das fontes de corrente (e com isso das feições heterogêneas) desenvolvemos um procedimento, denominado "inversão com vínculo de interface", que utiliza a resistividade elétrica do meio na construção de vínculos para a inversão de dados. Os resultados obtidos são comparados com procedimentos normalmente utilizados na interpretação de dados de potencial espontâneo mostrando a utilidade da abordagem desenvolvida.

ABSTRACT

Theoretical studies suggest that geophysical self-potential signals, generated by pumping tests or production wells in aquifers and petroleum reservoirs, can be used to characterize the geological media in the vicinity of the wells. This possibility appears to be feasible because distortions producing self-potential signals under conditions of forced circulation of water are localized in very strategic places of the medium, either at well terminations with water inflow or outflow as distributed along interfaces among contrasting geological unities. For homogeneous media theoretical developments forecast a kind of equivalence between pumping parameters and source terms modulating the self-potential response. This property has not been explored experimentally despite promising to characterize homogeneity for permeable media and develop field procedures to estimate transport properties for testing substrates. Our study develops laboratory experiments simulating pumping tests in porous media that verify the equivalence between hydraulic and electrical sources for homogeneous terrains, developing experimental and analytical procedures to interpret distortions caused by heterogeneities. Our experimental data set is analyzed with numerical modeling simulating coupled flow phenomena (water and charge) as expected in pumping tests. Based on the equivalence property among hydraulic and electrical sources we introduce procedures to characterize the surroundings of a testing well and localize heterogeneous features disturbing regular patterns in water circulation. To improve source imaging we develop an inversion approach termed as "interface locked constraint" that uses the background resistivity model as a priori information to data inversion. Results obtained with this technique are compared with procedures normally used to interpret self-potential data showing the usefulness of the presented approach.

ÍNDICE

RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 1 Modelagem de Dados de Potencial Espontâneo	5
1.1 Teoria dos Fluxos Acoplados	5
1.2 Dupla Camada Elétrica	7
1.3 Fontes de Corrente	9
1.3.1 Fontes em meios homogêneos	10
1.3.2 Fontes em uma interface	10
1.4 Formulação do Problema Direto	11
1.5 Formulação do Problema Inverso	13
1.5.1 Vínculo de Suavidade (VS)	14
1.5.2 Vínculo de Sensibilidade Acumulada (VSA)	14
1.5.3 Vínculo do Inverso da profundidade (VINP)	15
1.5.4 Escolha do Parâmetro de Regularização	15
1.5.5 Inversão Compacta (IC)	16
1.5.6 Condição de Eletroneutralidade	17
1.5.7 Inversão Compacta para dados de PE	18
1.5.8 Vínculo de Contraste (VC)	20
CAPÍTULO 2 Testes de Bombeamento: Parte Experimental	22
2.1 Medidas em Amostra	23
2.1.1 Acoplamento eletrocinético	23
2.1.2 Resistividade elétrica	25
2.1.3 Permeabilidade hidráulica	27
2.2 Experimentos em Tanque	28
2.2.1 Tanque de prova	29
2.2.2 Procedimentos preliminares	30
2.2.3 Potencial Elétrico	31

2.2.4	Potencial Eletrocinético	32
2.3	Ilustração dos Procedimentos de Medida	34
2.3.1	Potencial Elétrico	34
2.3.2	Potencial Eletrocinético	36
2.4	Resultados Obtidos	36
2.5	Discussão dos resultados	38
CAPÍTULO 3	Testes de Bombeamento: Modelagem Numérica	41
3.1	Aspectos Teóricos	41
3.1.1	O Problema Elétrico	41
3.1.2	O Problema Hidráulico	42
3.1.3	O Problema Eletrocinético	44
3.2	Modelagem Numérica	44
3.2.1	Construção do modelo	44
3.2.2	Formulação por elementos finitos	47
3.2.3	Problema elétrico	48
3.2.4	Problema eletrocinético	48
3.3	Resultados da modelagem dos fluxos elétrico e hidráulico	50
3.3.1	Caso A-B	51
3.3.2	Caso B-C	51
3.3.3	Caso C-D	51
3.4	Resultados da modelagem do potencial eletrocinético	52
3.4.1	Cálculo de Q_v	52
3.4.2	Caso A-B	53
3.4.3	Caso B-C	53
3.4.4	Caso C-D	53
3.5	Análise dos Resultados	53
CAPÍTULO 4	Mapeamento de Fontes de Corrente	59
4.1	Vínculos para o Mapeamento de Fontes	59
4.2	Resultados da inversão	60
4.3	Caso A-B	61
4.4	Caso B-C	61
4.5	Caso C-D	62
4.6	Resultados: vínculo de interface e eletroneutralidade	62
4.7	Caso A-B	62
4.8	Caso B-C e C-D	62
4.9	Análise dos resultados	62
CAPÍTULO 5	Conclusões	71

Agradecimentos	72
Referências	73

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Representação esquemática da dupla camada elétrica de Stern para uma fase mineral. A fase eletrolítica contém ânions e cátions de eletrólitos em solução. A distribuição iônica é fixa por adsorção nas camadas interna e externa difusa a partir do plano de escorregamento.	8
1.2	Representação esquemática do fluxo em um meio com contrastes de permeabilidade hidráulica. Setas indicam a direção do fluxo de água injetado no furo à esquerda e extraído à direita.	11
1.3	Curva-L; o ponto de inflexão da curva ("cotovelo") assinala o valor adequado para o parâmetro de regularização.	16
1.4	Vínculo de contraste: quadro esquemático representando a forma como as variações nas células vizinhas influem no cálculo do peso da célula que está sendo avaliada (no caso, $i = 16$). Os valores σ_i representam o valor de condutividade de cada célula.	21
2.1	Esquema de medida do potencial eletrocinético em função da carga hidráulica, ΔH . A altura da coluna é estabelecida por um reservatório (barrilete) instalado em um elevador. Um voltímetro conectado a eletrodos (Ag-AgCl) instalados nos terminais da amostra registra valores de potencial a cada 1s, por cerca de 60s, em cada altura do barrilete.	24
2.2	Potencial eletrocinético em função das alturas ΔH de 0, 50, 40, 30, 20, 10, 0cm, em dois ciclos de medida. Cada patamar corresponde a uma altura do barrilete. O tempo de registro em cada altura é da ordem de 60 s. Resistividade da água de 146 Ωm	25
2.3	Gráfico do potencial eletrocinético em função da carga hidráulica ΔH . Dados experimentais (círculos cheios) e reta ajustada por regressão linear (linha vermelha). O coeficiente angular da reta fornece o coeficiente de acoplamento eletrocinético C	26
2.4	Esquema de medida para o potencial elétrico resultante da passagem de corrente por uma amostra cilíndrica de rocha. Multímetro operando no modo de medição de potencial (V) e de corrente (A) funcionam como dataloggers conectados a um PC. Os dados registrados são utilizados no cálculo da resistividade elétrica da amostra.	27

2.5	Registro de corrente e de potencial para determinação da resistividade elétrica da amostra. Série temporal da corrente (acima) e do potencial (abaixo). Água de poro com resistividade de $146 \Omega\text{m}$	28
2.6	Potencial elétrico (mV) em função da corrente (mA) para uma amostra cilíndrica de rocha. Ajuste linear dos dados (linha vermelha) para determinar a resistência elétrica, R, a partir do coeficiente angular da reta.	29
2.7	Aparato experimental para medições de potenciais elétricos e eletrocinéticos. Vista do tanque mostrando pontos C e D conectados à bomba de infusão (Nexus 3000/Chemyx) através de duas seringas de 60 mL acopladas em direções opostas. O mecanismo da bomba de seringa permite que os êmbolos das seringas se desloquem em direções opostas com igual velocidade. Fixando a velocidade de acionamento, e considerando o tamanho da seringa, pode-se programar a taxa de injeção (vazão). Na face oposta do tanque, nas mesmas posições com injeção/retirada de água, estão eletrodos para injeção (polo positivo) e retirada (polo negativo) de corrente.	31
2.8	Pares de corrente e de potencial para a determinação da resistência elétrica de uma amostra. A resistividade elétrica é determinada utilizando este valor de resistência e medidas de comprimento e de seção transversal tomadas na amostra.	33
2.9	Potencial elétrico em função da intensidade de corrente, com pontos de injeção em A e B e medidas na estação 8 do perfil. Dados medidos (círculos em amarelo) e ajuste aos dados (vermelho). A grandeza R (coeficiente angular da reta) expressa a resistência de transferência para a medida em questão. Resistividade da água de poro de $470 \Omega\text{m}$	34
2.10	Potencial elétrico em resposta a uma fonte dipolar de corrente para injeção de corrente em A e em B (círculos em preto). Água de poro com resistividade de $470 \Omega\text{m}$. Perfil para injeção de corrente em B e C (vermelho), com resistividade da água de $468 \Omega\text{m}$. Perfil para os pontos de injeção de corrente em C e D (azul), com resistividade da água de $441 \Omega\text{m}$. Os potenciais foram multiplicados por $7,9347 \times 10^{-4}$ para garantir a mesma ordem de grandeza do perfil eletrocinético. Este fator de escala foi determinado por regressão linear do perfil elétrico com o eletrocinético.	35

2.11	Aquisição de dados de potencial eletrocinético para diferentes vazões (medido no eletrodo 8 do perfil): a) série temporal com vazões pré-determinadas, cada ciclo com passos de 15s incluindo: descanso, injeção em B/retirada em A, descanso, injeção em A/retirada em B. Este ciclo é repetido para as vazões de 70, 50, 55, 60, 65 e 70 mLmin ⁻¹ ; b) patamares de potencial assinalando intervalos (amarelo) usados para a tomada de valores médios e desvio padrão. O ciclo de injeção em B com retirada em A, gera um sinal positivo e o ciclo de retirada em B com injeção em A um sinal negativo. Os períodos de "descanso" servem para inferir a deriva do potencial e definição de linha de base para o estado ativo de bombeamento.	37
2.12	Potencial eletrocinético em teses de bombeamento: a) ciclos de injeção em B e retirada em A (linha vermelha) e de retirada em B e injeção em A (linha azul); b) perfis para injeção em B e retirada em A para as vazões de 50, 55, 60, 65 e 70 mLmin ⁻¹	38
2.13	Perfis de potencial elétrico e eletrocinético medidos em laboratório: a) perfil de potencial elétrico com pontos de corrente em A e B (preto), multiplicado por 7.9347×10^{-4} e potencial eletrocinético (rosa), resultante de injeção de água em B e retirada em A; b) potencial elétrico (corrente em C e B), multiplicado por 2.7540×10^{-4} e potencial eletrocinético (injeção em C e retirada em B); c) potencial elétrico (corrente em D e C preto), multiplicado por 3.0249×10^{-4} e potencial eletrocinético (injeção em D e retirada em C).	39
3.1	Construção geométrica do modelo: a) seção do modelo com peça porosa (cinza) e eletrodos (pontos pretos); b) modelo 3D obtidos a partir da 'extrusão' do modelo 2D. Dimensões em centímetros.	45
3.2	Seleção de domínios no modelo, para a definição de propriedades físicas dos meios. a) domínio da água e b) domínio da peça porosa.	46
3.3	Malha de discretização para modelagem numérica de campos elétricos e hidráulicos usando métodos dos elementos finitos.	47
3.4	Seleção de domínios no modelo, para a definição de propriedades físicas e condições de fronteira. a) seleção de furo para especificação de fontes de corrente (caso elétrico) ou parâmetro de fluxo (caso hidráulico); b) seleção de faces do tanque implementando regime de fluxo nulo nos limites do tanque; c) seleção de interfaces para determinação do parâmetro de fluxo e cálculo das fontes de corrente do potencial eletrocinético na face superior da peça porosa e d) seleção da face inferior da peça porosa.	49

3.5	Resultados da modelagem para o Caso A-B: a) fluxo de corrente (linhas em branco) resultante de polos de corrente (negativo à esquerda, positivo à direita) e potencial elétrico associado (mapa em cores); b) fluxo de água e campo de pressão associado. Injeção à direita e retirada à esquerda com vazão de 60mLs^{-1} . Note as linhas de fluxo deformadas na presença dos furos.	55
3.6	Resultados da modelagem para o Caso B-C: a) fluxo de corrente (linhas em branco) resultante de polos de corrente (negativo à esquerda, positivo à direita) e potencial elétrico associado (mapa em cores); b) fluxo de água e campo de pressão resultante de injeção no furo à direita e retirada à esquerda com vazão de 60mLs^{-1} . Note o gradiente de pressão que se estabelece entre as câmaras superior e inferior do tanque devido a proximidade do furo de injeção com a fratura.	56
3.7	Resultados da modelagem, Caso C-D: a) fluxo de corrente (linhas em branco) resultante de polos de corrente (negativo à esquerda e positivo à direita) e potencial elétrico associado (mapa em cores); b) fluxo de água e campo de pressão associado. Injeção à direita e retirada à esquerda com vazão de 60mLs^{-1} . Linhas de fluxo atravessando a fratura obliquamente no caso elétrico e perpendicularmente no caso eletrocinético.	57
3.8	Resultado de potencial eletrocinético medido em laboratório (pontos cheios) e calculado pela modelagem (linhas contínuas). A figura esquemática do tanque que acompanha os gráficos mostra o ponto de injeção da água (marcado por um 'x') e os pontos de retirada (marcado por um '.'). a) os perfis apresentam ajuste perfeito; b) a forma da anomalia calculada respeita a polaridade da curva do dado medido; c) a forma da curva da anomalia medida concorda com o dado de laboratório até a proximidade da posição da fratura; d) potencial eletrocinético medido em laboratório em função do potencial calculado através da modelagem física.	58
4.1	Figura esquemática do fluxo de água gerado em testes de bombeamento (esquerda) e distribuição de corrente correspondente (direita). Esquema para bombeamento longe (a e b), ao lado (c e d) e envolvendo (e e f) a descontinuidade. Linhas do fluxo de água (tracejado) e polos positivos (+) e negativos (-) de corrente na interface.	64

INTRODUÇÃO

O método do potencial espontâneo (PE) é um método geofísico do tipo passivo, baseado na medição de potenciais elétricos naturalmente existentes na superfície terrestre, que se estabelecem em resposta a fontes de corrente no substrato (Corwin, 1990). Um dado medido em campo expressa a diferença de potencial obtida com um voltímetro de alta impedância conectado a um par de eletrodos não polarizáveis em contato com o solo, um dos quais, usado como estação de referência (ou base). A partir de um conjunto de dados, sob a formulação de um problema linear inverso (Minsley, Sogade e Morgan, 2007b; Mendonça, 2008a), pode-se determinar a distribuição de corrente que causa o campo medido. Esta formulação requer um modelo de resistividade para o substrato, que na prática, pode ser obtido com a inversão de dados elétricos ou eletromagnéticos (Telford, Geldart, Sheriff e Keys, 1976).

O método do PE tem recebido atenção nos últimos anos pois a interpretação com modelos utilizando fontes de corrente fornece informações sobre processos dinâmicos que estão ativos no substrato terrestre (Snieder, Hubbard, Haney, Bawden, Hatchell, Revil e Geophysical Monitoring Working Group, 2007; Atekwana e Slater, 2009; Revil, Mendonça, Atekwana, Kulesa, Hubbard e Bohlen, 2010). Esta associação é prescrita pela teoria dos fluxos acoplados (Onsager, 1931; Marshall e Madden, 1959; Sill, 1983) que considera o sinal de PE como decorrente de fluxos primários de massa ou carga (elétrons e íons) causados por gradientes de pressão e concentração, respectivamente. O fluxo primário redistribui as cargas no meio gerando um potencial elétrico - o potencial espontâneo - que se contrapõe à separação de cargas. O potencial secundário cria um fluxo acoplado (ou secundário) na forma de uma corrente de condução (ou ôhmica).

No regime de acoplamento, os fluxos primário e secundário possuem divergência compartilhada, a menos da troca de sinais, significando que a fonte de um dos fluxos é o sorvedouro do seu correspondente acoplado. Os termos com divergência não nula têm o significado de fontes de corrente e, por serem compartilhados, permitem que sejam determinados a partir do campo de PE que efetivamente é mensurável por sensores remotos. Cria-se, assim, uma rota de interpretação que tem sido explorada em muitos estudos, a saber: determinar as fontes de corrente a partir da inversão da anomalia de PE e utilizá-las para caracterizar o fluxo primário.

Fenômenos genericamente descritos na Geofísica como "processos redox" possuem como fluxo primário o transporte de elétrons ao longo de unidades geológicas constituídas por minerais condutores (grafita, principalmente) ou semi-condutores (sulfetos, por exemplo).

O fluxo de elétrons ocorre quando a massa mineral intercepta gradientes com potencial de oxidação e redução (potencial ORP) e sustenta reações de meia-célula nas extremidades. O fluxo primário de elétrons é compensado por fluxos secundários de compostos iônicos, em solução no meio aquoso que circunda a massa mineral. Nesta condição um corpo mineral funciona como uma "geobateria" (Sato e Mooney, 1960; Sivenas e Beales, 1982) e os pólos de corrente que causam a anomalia de PE expressam a polaridade e intensidade das reações de meia cela. O modelo de geobateria tem formulação matemática (Stoll, Bigalke e Grabner, 1995; Bigalke e Grabner, 1997) desenvolvida com base na equação de Butler-Volmer (Bockris, Reddy e Gamboa-Aldeco, 2001) que descreve a transferência de elétrons nas reações de meia célula de um sistema eletroquímico. Modelos geofísicos com interesse na prospecção mineral podem ser simulados usando a formulação por geobateria (Mendonça, 2008a). Experimentos de laboratório (Castermant, Mendonça, Revil, Trolard, Bourrié e Linde, 2008) mostram a validade deste modelo e de sua utilidade na interpretação de dados de prospecção mineral.

Mais recentemente, o modelo de biogeobateria foi estendido para estudos de problemas ambientais, no que se denomina "biogeobateria" (Revil, Mendonça, Atekwana, Kulesa, Hubbard e Bohlen, 2010). O modelo de biogeobateria incorpora diversos elementos existentes nos modelos anteriores de geobateria exceto pelo fato de admitir que o meio que serve como ponte para a transferência de elétrons, em vez de constituído por massa mineral condutiva, é composto por uma trama de material orgânico sintetizado por bactérias, quer na forma estritamente orgânica ou por interconexão com minerais condutivos. Estruturas orgânicas com propriedades condutivas foram identificadas em vários estudos sendo genericamente denominadas de *nanowires* (Reguera, McCarthy, Mehta, Nicoll, Tuominen e Lovley, 2005; Gorby, Yanina, McLean, Rosso, Moyles e Dohnalkova, 2006; Ntarlagiannis, Atekwana, Hill e Gorby, 2007). Este modelo recentemente foi validado por experimento de laboratório (Fachin, Abreu, Mendonça, Revil, Novaes e Vasconcelos, 2012). O modelo de biogeobateria procura explicar a origem de sinais de PE resultantes de processos redox, observados em áreas contaminadas. Estudos de campo mostram a recorrência desta associação (Naudet, Revil e Bottero, 2003; Minsley, Sogade e Morgan, 2007a; Revil, Mendonça, Atekwana, Kulesa, Hubbard e Bohlen, 2010) em diferentes cenários de aplicação.

Anomalias de PE são também geradas quando a água subterrânea se movimenta em meios geológicos permeáveis. A passagem de água por capilares e meios porosos em geral está associada a fenômenos eletrocínéticos, o mais significativo na geofísica de exploração sendo denominado "potencial de infiltração" ou "streaming potential" (Delgado, González-Caballero, Hunter, Koopal e Lyklema, 2007). Diversas aplicações decorrem da utilização do potencial de infiltração em problemas de hidrogeologia: mapeamento da infiltração em barragens de terra (Al-Saigh, Mohammed e Dahham, 1994; Panthulu, Krishnaiah e Shirke, 2001; Rozycki, Fonticiella e Cuadra, 2006; Sheffer e Oldenburg, 2007) e diques (Bolève, Revil, Janod, Mattiuzzo e Fry, 2009); reconhecimento do padrão de fluxo regional em terrenos

cársticos (Vichabian e Morgan, 2002; Jardani, Dupont e Revil, 2006), estudos hidrogeológicos em terrenos cristalinos (Morgan, Williams e Madden, 1989; Medeiros e de Lima, 1999; Fagerlund e Heison, 2003), regimes de circulação da água subterrânea em edifícios vulcânicos (Revil e Saracco, 2003; Ishido, 2004; Hase, Hashimoto, Sakanaka, Kanda e Tanaka, 2005; Aizawa, Ogawa e Ishido, 2009), entre outros. Para não duplicar a terminologia, pode-se utilizar "potencial espontâneo" ao referir-se ao "potencial de infiltração" medido em regime de campo quando no estudo do fluxo e padrões de circulação da água subterrânea.

A geração de um sinal de PE resultante do movimento de água subterrânea sob ação de um gradiente de pressão é explicado em termos da Dupla Camada Elétrica (DCE) formada na interface água-mineral nos poros das rochas (Revil, Karaoulis, Johnson e Kemma, 2012). A água do poro é caracterizada por uma densidade de carga volumétrica que corresponde às cargas nas camadas difusa e fixa. Em uma camada difusa, a carga em excesso é posta em movimento à medida que a água de poro move-se, criando uma corrente de convecção ao longo das linhas de fluxo. Esta corrente é balanceada por uma corrente de condução que gera o potencial elétrico medido no levantamento de PE. Além das aplicações numéricas de simulação, dados experimentais têm direcionado para áreas inexploradas, a maioria delas incorporando a idéia de induzir a resposta de PE para recuperar informação acerca das propriedades do meio. Para os reservatórios de petróleo e gás, simulações numéricas tem demonstrado a viabilidade em caracterizar frentes com contraste água-petróleo na produção de poços (Wurmstich e Morgan, 1994).

Apesar de fracos, potenciais de PE são esperados em ambientes salinos, sendo sensíveis ao avanço da frente de água até distâncias de 100m do poço de produção. Esta propriedade tem sido utilizada para desenvolver sistemas de monitoramento em tempo real para reservatórios de petróleo (Saunders, Jackson e Pain, 2008). Para anomalias medidas em aquíferos durante testes de bombeamento (Titov, Ilyin, Konosavsky e Levitsk, 2002; Darnet, Marquis e Sailhac, 2003), os dados de PE complementam a falta de monitoramento com dados diretos de poços, melhorando as estimativas nas propriedades físicas. A inversão dos dados, por exemplo, pode estimar a condutividade hidráulica, a profundidade e a espessura do aquífero (Darnet, Marquis e Sailhac, 2003). A depressão cônica produzida em testes de bombeamento pode ser modelada com relações lineares existentes entre a anomalia de PE e a profundidade do nível freático em aquíferos livres (Fournier, 1989; Malama, Revil e Kuhlman, 2009). A modelagem dessa depressão permite determinar a distribuição espacial da transmissividade hidráulica do aquífero (Straface, Fallico, Troisi, Rizzo e Revil, 2007).

Em princípio, sinais de PE resultantes de testes de bombeamento podem melhorar o imageamento de subsuperfície, pois fontes de corrente são induzidas em locais estratégicos do meio (Sill, 1983), a saber: i) onde a água entra ou sai do meio poroso e ii) nas interfaces dos materiais com contraste de propriedades (condutividade elétrica, condutividade hidráulica, EDL de interface). Nas terminações de injeção e sucção uma equivalência é esperada entre

correntes associadas à circulação de água e correntes verdadeiras tais como seriam produzidas com uma fonte externa (gerador). Esta propriedade não tem sido explorada experimentalmente apesar de promissora em determinar a densidade de carga em meios geológicos, um parâmetro chave para interpretar dados de PE em hidrogeofísica. Em interfaces contrastantes esta equivalência não pode ser experimentalmente testada, dada a impossibilidade em se instalar uma rede de eletrodos na interface entre meios distintos. Entretanto, como sugerido por (Saunders, Jackson e Pain, 2008), as fontes secundárias moldam substancialmente a anomalia de PE na vizinhança de heterogeneidades no meio. A localização das fontes pode auxiliar a detecção de heterogeneidades, em processo denominado de "imageamento de fontes secundárias" (Minsley, 2007).

Neste trabalho, apresentamos um experimento desenvolvido em laboratório no qual potenciais são gerados em um modelo físico (tanque), usando uma bomba de seringa de precisão, com regime programável de vazão simulando um teste de bombeamento. A repetibilidade e consistência dos sinais medidos aprimoram o conhecimento acerca da resposta de meios geológicos em testes de bombeamento, permitindo delinear procedimentos para posterior aplicação em condições de campo. Nossos resultados mostram a correspondência entre fontes de corrente geradas na circulação de água com fontes reais de correntes geradas por um gerador de corrente. Este resultado, embora teoricamente esperado é pela primeira vez claramente observado experimentalmente em associação com um problema geofísico. Nossos resultados mostram também como os distúrbios causados por heterogeneidades podem ser usados para explorar o ambiente ao redor do poço de bombeamento identificando domínios homogêneos ou heterogêneos.

Esta monografia estrutura-se em quatro capítulos. O Capítulo 1 discute aspectos teóricos sobre a origem do sinal de potencial espontâneo relacionado ao fluxo de água e a formulação para a interpretação de dados usando procedimentos de inversão. Este capítulo introduz também a inversão com vínculo de interface, que leva em conta o modelo de resistividade do meio na formulação da matriz de peso do problema inverso. O Capítulo 2 apresenta resultados experimentais nos quais testes de bombeamento e medição de anomalias de PE são desenvolvidos em um modelo físico. O Capítulo 3 apresenta resultados de simulação numérica dos experimentos em tanque com o objetivo de auxiliar a interpretação dos dados experimentais e definir procedimentos de análise. O Capítulo 4 desenvolve testes com inversão de dados com o propósito de verificar a capacidade dos vínculos existentes na interpretação de dados de PE em recuperar a distribuição de fontes esperadas em testes de bombeamento.

CAPÍTULO 1

Modelagem de Dados de Potencial Espontâneo

O sinal do potencial espontâneo surge em resposta a fontes de correntes naturalmente existentes no substrato terrestre, geradas em processos químicos de oxidação e redução (processos redox) (Bigalke e Grabner, 1997; Mendonça, 2008a) ou pela movimentação da água subterrânea pelos poros de solos e rochas (potencial eletrocinético) (Sill, 1983; Ishido e Pritchett, 1999). Para fenômenos eletrocinéticos, a resposta do meio requer o cálculo do fluxo de água que se estabelece sob um campo de pressão (potencial primário), a determinação das fontes de corrente associadas e, por fim, o cálculo do potencial elétrico correspondente. Este procedimento configura o que se denomina *problema direto* para o cálculo do potencial espontâneo, no qual assume-se como conhecidos o modelo de permeabilidade hidráulica e de resistividade elétrica do substrato. O *problema inverso*, por outro lado, parte do princípio que a resistividade do meio é conhecida e utiliza o conjunto de dados para determinar a distribuição das fontes de corrente que o gerou. Os termos de corrente são, posteriormente, utilizados para caracterizar as propriedades físicas do meio e do fluxo da água subterrânea. Este Capítulo aborda, de forma resumida, aspectos gerais referentes à modelagem de dados de potencial espontâneo, entendida aqui como sendo os procedimentos de modelagem direta e inversa que se aplicam aos dados medidos. Além disso, apresentamos uma nova implementação do vínculo de Inversão Compacta, modificando-o para lidar com fontes positivas e negativas. Apresentamos também um novo vínculo, que chamamos de Vínculo de Contraste, porque leva em consideração que a distribuição de fontes de corrente deve concentrar-se na interface entre materiais distintos. Incorporamos a condição de eletroneutralidade que implementa o vínculo físico da conservação da carga no procedimento iterativo da inversão compacta.

1.1 Teoria dos Fluxos Acoplados

A Teoria dos Fluxos Acoplados foi desenvolvida por Onsager (1931) e aplicada a problemas geofísicos pioneiramente por Marshall e Madden (1959) e Sill (1983). Por esta teoria, o potencial espontâneo é o potencial elétrico que surge acoplado a um fluxo de água, calor ou

de carga (no caso de processo redox) que genericamente é denominado *fluxo primário*. O fluxo primário é causado por um gradiente de potencial, para os casos anteriores, respectivamente de pressão, temperatura ou potencial redox.

Consideremos um regime de fluxos acoplados envolvendo a percolação da água, J_s , em um meio poroso e transporte de carga, J_q , associados a gradientes nos campos de pressão, P , e de potencial elétrico, Φ . A teoria de fluxos acoplados estabelece que

$$\begin{bmatrix} J_s \\ J_q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \nabla P \\ \nabla \Phi \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

e, pela relação de reciprocidade de Onsager, que $L_{12} = L_{21} \equiv L$. Para meios saturados e com fluxo laminar, o parâmetro L_{11} é dado por

$$L_{11} = \frac{k}{\mu} \quad (1.2)$$

sendo k a permeabilidade hidráulica do meio (m^2), μ a viscosidade da água (Pa s) e $L_{22} = \sigma$, sendo σ a condutividade elétrica (Sm^{-1}) do meio. O parâmetro de acoplamento cruzado, é dado por

$$L = \frac{kQ_v}{\mu}, \quad (1.3)$$

sendo Q_v a densidade volumétrica de carga (Cm^{-3}) na interface dos minerais. Substituindo estes valores na equação 1.1 obtemos

$$\begin{bmatrix} J_s \\ J_q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{k}{\mu} & \frac{kQ_v}{\mu} \\ \frac{kQ_v}{\mu} & \sigma \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \nabla P \\ \nabla \Phi \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

que fornece as expressões para os fluxos considerados. O fluxo de massa (água) é dado por

$$J_s = -\frac{k}{\mu} \nabla P - \frac{kQ_v}{\mu} \nabla \Phi \quad (1.5)$$

e o fluxo de corrente por

$$J_q = -\sigma \nabla \Phi - \frac{kQ_v}{\mu} \nabla P. \quad (1.6)$$

O primeiro termo de J_s , na equação 1.5, expressa a velocidade de infiltração de Darcy, v (m s^{-1}), dada pela Lei de Darcy

$$v = -\frac{k}{\mu} \nabla P. \quad (1.7)$$

O segundo termo pode ser desprezado, tornando a equação (1.5), apenas $J_s \cong k/\mu \nabla P$. Essa simplificação (Nourbehecht, 1963) é possível porque para valores geofísicos típicos, $L_{11} = 10^{-15}$ e $L = 10^{-10}$ fazendo com que os gradientes dos campos eletrocinético e de pressão, assumam valores da ordem de 5×10^{-12} (Vm^{-1}) e 5×10^5 (Pam^{-1}), gerando uma diferença de duas ordens de grandeza entre o primeiro e segundo termo da equação.

1.2 Dupla Camada Elétrica

A densidade volumétrica de carga, Q_v , que aparece na equação 1.3, é a expressão macroscópica de um fenômeno de interface denominado Dupla Camada Elétrica (DCE), que ocorre no contato de um grão mineral com o fluido de poro que preenche os interstícios vazios (poros) de solos e rochas. As propriedades da DCE são descritas em estudos nas áreas de filmes finos, físico-química de colóides (Masliyah e Bhattacharjee, 2006) e, mais recentemente, como um conceito fundamental para o entendimento de propriedades elétricas e hidrodinâmicas de meios porosos (Revil, Karaoulis, Johnson e Kemma, 2012).

Basicamente, a estruturação de cargas na interface mineral-solução (considerando a água subterrânea como sendo uma solução aquosa, já que contem sais dissolvidos) decorre do excesso de carga elétrica que existe na interface do mineral, normalmente expondo o oxigênio (eletronegativo) dos constituintes de sílica e alumina que compõe a grande maioria dos materiais geológicos. A interface dos minerais formadores de rocha (quartzo, feldspato, argilo-minerais, etc.) apresentam assim, uma predominante exposição de cargas negativas. Quando em contato com uma solução aquosa, os íons em solução são reorganizados formando uma ‘nuvem’, ou *camada difusa*, de íons positivos que compensa o excesso de carga negativa na interface do mineral. O termo dupla camada surgiu desta organização de cargas com sinais opostos que, grosso modo, se assemelha com a distribuição de cargas em um capacitor. Embora as cargas na fase sólida possam ser consideradas fixas (a menos se deslocadas, por exemplo, pela passagem de uma onda sísmica), as cargas na camada difusa podem movimentar-se com o fluxo da água a partir de uma distância característica, denominada *plano de deslizamento*. A Figura 1.1 ilustra a interação entre o grão sólido e o fluido e a estruturação de cargas que ocorre na interface, provocando uma anisotropia local, que persiste até uma distância do contato com o mineral. A espessura da DCE, assumindo o modelo de Gouy-Chapman (Masliyah e Bhattacharjee, 2006), pode ser estimada pela grandeza

$$k^{-1} = \left(\frac{\epsilon k_B T}{2e^2 z^2 n_\infty} \right)^{1/2}, \quad (1.8)$$

denominada comprimento de Debye, sendo ϵ a permissividade dielétrica da água (Fm^{-1}), T a temperatura absoluta (K), z a valência da espécie iônica, n_∞ concentração volumétrica dos íons (molL^{-1}), $k_B = 1,3806503 \times 10^{-23}$ (JK^{-1}) a constante de Boltzmann, $e = 1,60217653 \times 10^{-19}$ (C) a carga unitária do elétron.

A quantidade de carga na camada difusa é dada por Masliyah e Bhattacharjee (2006)

$$Q_v = \epsilon k \zeta \quad (1.9)$$

que considera o potencial ζ (zeta) como sendo o potencial elétrico no plano de deslizamento.

Experimentalmente, e principalmente para materiais argilosos, a densidade de carga Q_v pode ser obtida a partir da *Capacidade de Troca Catiônica*, CTC , expressa em (Ckg^{-1}),

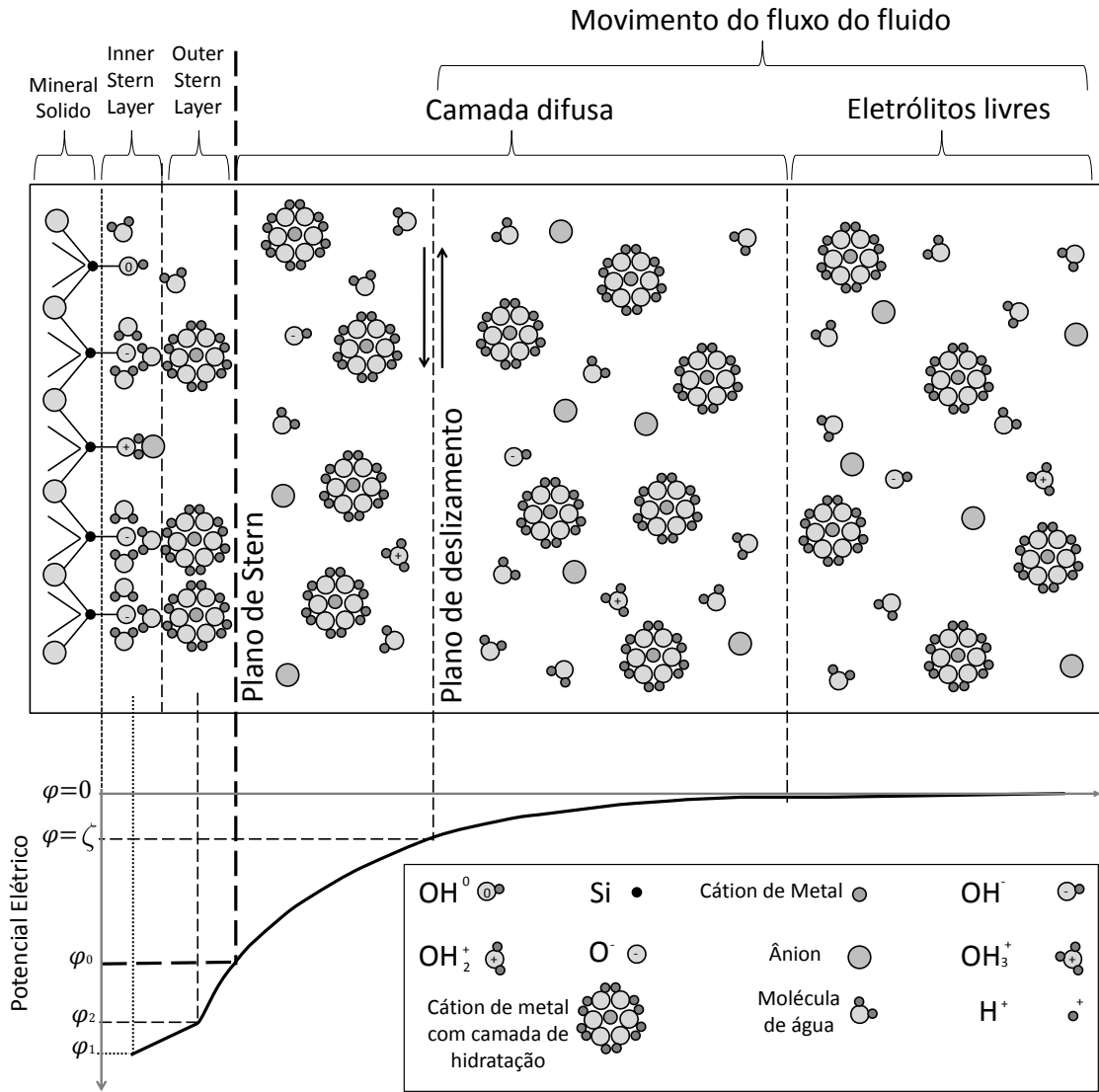


Figura 1.1: Representação esquemática da dupla camada elétrica de Stern para uma fase mineral. A fase eletrolítica contém ânions e cátions de eletrólitos em solução. A distribuição iônica é fixa por adsorção nas camadas interna e externa difusa a partir do plano de escorregamento.

segundo (Revil, 2012) dada por

$$Q_v = \rho_g \left(\frac{1 - \phi}{\phi} \right) CTC \quad (1.10)$$

sendo ρ_g a densidade do grão em (kg m^{-3}), ϕ a porosidade do meio (adimensional). Quando se conhece a permeabilidade do meio, a propriedade Q_v pode ainda ser calculada, segundo (Jardani, Revil, Bolève, Crespy, Dupont, Barrash e Malama, 2007) pela relação

$$\log(Q_v) = -9,2349 - 0,8219 \log(k). \quad (1.11)$$

Também a partir de procedimentos experimentais (Mendonça, Dotti, Maida e Silva, 2012), define-se o parâmetro de *acoplamento eletrocinético*, C , dado por

$$C = -\frac{\epsilon\zeta}{\mu} \frac{\bar{\rho}g}{\sigma_f(1 + 2Du)}. \quad (1.12)$$

normalmente expresso (mV Pa), sendo ϵ , μ e σ_f , respectivamente a permissividade elétrica (Fm^{-1}), viscosidade (Pas) e condutividade elétrica (Sm^{-1}) para o fluido de poro. O número de Dukhin, Du , expressa a razão entre as condutividades elétricas de superfície (dependente do excesso de carga na dupla camada) e de volume (dependente do fluido de poro) (Boldve, Crespy, Revil, Janod e Mattiuzzo, 2007). O termo $\bar{\rho}$ expressa a densidade da água (kg m^{-3}) e g a aceleração da gravidade (m s^{-2}).

1.3 Fontes de Corrente

O fluxo J_q na equação 1.6 expressa a densidade de corrente (Am^{-2}) que se estabelece no meio, em resposta ao fluxo primário de massa, J_s . Na condição de estacionaridade temos $\nabla \cdot J_q = 0$, e assim que

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \Phi) = -\nabla \cdot \left(\frac{kQ_v}{\mu} \nabla P \right). \quad (1.13)$$

Definindo a grandeza q_v , para representar a densidade volumétrica de corrente (Am^{-3}), a equação 1.13 pode ser decomposta em

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \Phi) = -q_v \quad (1.14)$$

e

$$q_v = \nabla \cdot \left(\frac{kQ_v}{\mu} \nabla P \right). \quad (1.15)$$

A equação 1.14 configura o que se denomina nos métodos geoeletricos de problema elétrico DC (corrente contínua) (Bolève, Revil, Janod, Mattiuzzo e Jardani, 2007), no qual determina-se o potencial elétrico Φ que se estabelece em um meio com condutividade σ , quando no mesmo se aplica uma fonte de corrente q_v . Em combinação com a equação 1.15, temos que o potencial gerado depende do fluxo e das propriedades hidráulicas do meio.

Considerando um volume elementar \mathcal{V} , com superfície \mathcal{S} , pode-se definir pólos com intensidade de corrente $I_{\mathcal{V}}$ (A), tal que

$$I_{\mathcal{V}} \equiv \int_{\mathcal{V}} q_v dv. \quad (1.16)$$

Expressões distintas para as fontes de corrente (Silva, Vasconcelos e Mendonça, 2012) são obtidas dependendo das características do meio que o volume \mathcal{V} engloba, se contendo uma

parte homogênea do meio ou abrangendo heterogeneidades. As duas condições são abordadas a seguir, representando o meio heterogêneo pela composição de dois meios homogêneos justapostos.

1.3.1 Fontes em meios homogêneos

Consideremos uma posição do meio em que Q_v e a razão k/μ sejam constantes. A uniformidade de Q_v expressa a condição em que a densidade de carga na DCE é constante, como tal, compatível com uma invariância nas propriedades de interface dos minerais que formam as rochas. A uniformidade da razão k/μ basicamente expressa um material com permeabilidade constante já que a viscosidade da água (μ), não apresenta variação significativa na maioria dos estudos de hidrogeologia, exceto em caso de hidrotermalismo. Nestas condições a densidade volumétrica de corrente, q_v , é dada pela equação 1.15. Integrando os dois lados dessa equação em um volume elementar \mathcal{V} , aplicando o Teorema de Gauss, e considerando a equação 1.7 (Lei de Darcy), a intensidade de corrente $I_{\mathcal{V}}$ (A) é dada por

$$I_{\mathcal{V}} = -Q_v \Gamma_{\mathcal{S}}, \quad (1.17)$$

sendo

$$\Gamma_{\mathcal{S}} = \int_{\mathcal{S}} v \cdot d_s \quad (1.18)$$

a vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) que passa pela superfície fechada \mathcal{S} .

Nos pontos de injeção e de retirada o termo $\Gamma_{\mathcal{S}}$ é diferente de zero, sendo positivo nos pontos de retirada (onde o fluido sai do meio poroso) e negativo nos pontos de injeção (fluido entra nesse meio). Nos demais pontos $\Gamma_{\mathcal{S}} = 0$ pois o fluxo atravessa por completo a superfície \mathcal{S} que é fechada.

1.3.2 Fontes em uma interface

A singularidade para o termo de corrente sobre uma interface separando meios distintos foi resolvida por Silva (2011). Para uma interface de área \mathcal{A} separando meios 1 e 2 com $Q_{v,1}$ e $Q_{v,2}$, o termo de corrente é dado por

$$q_{\mathcal{V}} = (Q_{v,2} - Q_{v,1}) \Gamma_{\mathcal{A}}, \quad (1.19)$$

se considerarmos a direção de fluxo como indo do meio 1 para o meio 2, atravessando a interface. Por exemplo, para $Q_{v,2} > Q_{v,1}$ e fluxo do meio 1 para o meio 2, a interface assim definida teria resposta compatível com o acúmulo de polos positivos de corrente e, portanto, podendo ser reconhecida por um potencial elétrico positivo em sua vizinhança.

Para meios com contraste de permeabilidade Figura 1.2 a relação está implícita na equação 1.16, uma vez que o volume a ser integrado corresponde ao volume total dos poros

preenchidos com fluido e este é maior em meios permeáveis. Assim, em um meio com Q_v constante e contraste de permeabilidade, os polos de corrente estarão presentes nas interfaces com contraste de permeabilidade.

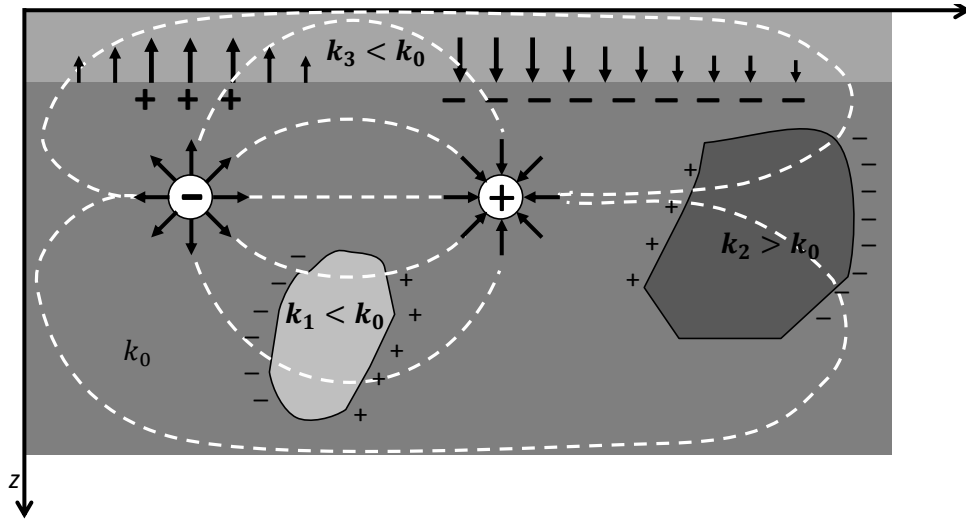


Figura 1.2: Representação esquemática do fluxo em um meio com contrastes de permeabilidade hidráulica. Setas indicam a direção do fluxo de água injetado no furo à esquerda e extraído à direita.

1.4 Formulação do Problema Direto

O problema direto para dados de potencial espontâneo consiste no cálculo do potencial elétrico quando se conhece a distribuição de resistividade do meio (*modelo de resistividade*) e a distribuição das fontes de corrente. No esquema de diferenças finitas, o substrato é representado por uma malha de prismas justapostos, normalmente referenciada em um sistema de coordenadas cartesianas, com o eixo x ao longo do perfil e o eixo z assinalando a profundidade, crescendo em direção ao interior da Terra. O potencial elétrico é calculado sobre os nós da malha que define o modelo. Cada prisma (ou célula) da malha tem condutividade/resistividade constante, mas pode variar de um prisma para o outro. As condições de contorno para o problema elétrico DC impõem densidade de corrente nula na superfície do solo e condições mistas para pontos nas extremidades lateral e inferior da malha (Dey e Morrison, 1979).

Na formulação por diferenças finitas o potencial elétrico é determinado pela solução de um sistema de equações lineares

$$\mathbf{A}\mathbf{u} = \mathbf{q} \quad (1.20)$$

no qual \mathbf{q} é um vetor n -dimensional com os termos de corrente e \mathbf{A} a matriz das condutâncias de ordem $n \times n$. Esta equação se aplica para métodos ativos (Método da Eletroresistividade) ou passivos (Potencial Espontâneo). Nos métodos ativos os termos de corrente são conhecidos (posição e intensidade) e, nos métodos passivos, resultam da divergência de campos primários naturais (equações 1.14 e 1.15).

A equação matricial 1.20 pode ser redimensionada a partir da seleção dos pontos da malha, nos quais o conjunto de medidas foi tomado. Considerando m estações de medida, nas posições $\mathbf{I}(i)$, $i = 1, \dots, m$, os potenciais no vetor \mathbf{u}_o , são descritos (Mendonça, 2008a; Minsley, Sogade e Morgan, 2007b) por

$$\mathbf{u}_o = \mathbf{Q}\mathbf{u}, \quad (1.21)$$

sendo \mathbf{Q} uma matriz $m \times n$ cujas linhas são compostas por deltas de Kronecker $\delta_{j,i}^T$, o termo T denotando a transposição de uma matriz ou vetor. Por definição, todos os elementos em $\delta_{j,i}^T$ são iguais a zero exceto o j -ésimo termo que é igual a 1. A matriz \mathbf{Q} é denominada *matriz de amostragem* pois seleciona valores específicos no vetor de potenciais \mathbf{u} . Para um conjunto de dados, a matriz de amostragem é

$$\mathbf{Q} \equiv \begin{pmatrix} \delta_{l(1)}^T \\ \delta_{l(2)}^T \\ \vdots \\ \delta_{l(n)}^T \end{pmatrix}. \quad (1.22)$$

Definindo uma matriz \mathbf{R}_∞ , tal que

$$\mathbf{R}_\infty = \mathbf{Q}\mathbf{A}^{-1}, \quad (1.23)$$

a equação 1.21 torna-se

$$\mathbf{u}_o = \mathbf{R}_\infty\mathbf{q}. \quad (1.24)$$

Uma vez que os valores em \mathbf{u} e \mathbf{q} são expressos em volt e ampère, respectivamente, os elementos da matriz \mathbf{R}_∞ são expressos em ohm, razão pela qual a matriz \mathbf{R}_∞ é denominada *matriz de resistência*. O sistema linear na equação 1.24 configura uma forma generalizada da Lei de Ohm onde cada linha da matriz de resistência contém a resposta do modelo para uma fonte de corrente unitária na posição de medida. Como tal, esta resposta expressa a função de Green (em forma numérica) para o modelo de resistividade/condutividade considerado.

Para calcular um valor do potencial espontâneo, u_l , na l -ésima estação, aplica-se a expressão

$$u_l = \mathbf{r}_l^T \mathbf{q} \quad (1.25)$$

sendo a \mathbf{r}_l a l -ésima linha da matriz de resistência.

Para representar a estação de referência, subtrai-se o potencial u_{ref} , tal que $u_{ref} = \mathbf{r}_{ref}^T \mathbf{q}$ do potencial u_l . O vetor, \mathbf{u}_m , com o conjunto de leituras de diferença de potencial, é representado por

$$\mathbf{u}_m = \begin{pmatrix} u_1 - u_{ref} \\ u_2 - u_{ref} \\ \vdots \\ u_l - u_{ref} \end{pmatrix}. \quad (1.26)$$

Pode-se, assim, definir uma matriz \mathbf{R}_{ref} cujas linhas são os vetores as diferenças $\mathbf{r}_l^T - \mathbf{r}_{ref}^T$, $l = 1, 2, \dots, m$,

$$\mathbf{R}_{ref} = \begin{pmatrix} \mathbf{r}_1^T - \mathbf{r}_{ref}^T \\ \mathbf{r}_2^T - \mathbf{r}_{ref}^T \\ \vdots \\ \mathbf{r}_l^T - \mathbf{r}_{ref}^T \end{pmatrix} \quad (1.27)$$

representando a base de dados por uma forma generalizada da equação 1.24 dada por

$$\mathbf{u}_m = \mathbf{R}_{ref}^T \mathbf{q}, \quad (1.28)$$

que considera que as medidas foram tomadas com relação a uma estação de referência em particular.

1.5 Formulação do Problema Inverso

O problema inverso consiste em estimar o vetor n -dimensional $\mathbf{q} \equiv [q_1, \dots, q_n]^T$ com os valores de corrente q_i nos nós da malha de resistividade que representa o meio, utilizando a base de dados $\mathbf{u}_o = [u_{o_1}, \dots, u_{o_m}]^T$ e a relação matricial na equação 1.28. Este problema caracteriza-se por ser do tipo linear e a *condição de aceitabilidade* (elegibilidade) para uma solução representando a distribuição de corrente, \mathbf{q} , é que o funcional de resíduos \mathcal{Q}

$$\mathcal{Q} = (\mathbf{u}_o - \mathbf{R}\mathbf{q})^T \mu_e \mathbf{W}_e (\mathbf{u}_o - \mathbf{R}\mathbf{q}) + \mathbf{q}^T (\mu_q \mathbf{W}_q) \mathbf{q} \quad (1.29)$$

seja minimizado. Para simplificar a notação, estamos assumindo $\mathbf{R}_{ref} \equiv \mathbf{R}$.

O termo $\mathbf{R}\mathbf{q}$ representa, em forma matricial, o problema direto para dados de potencial espontâneo pois calcula o potencial elétrico correspondente à distribuição de corrente \mathbf{q} , $\mu_e \mathbf{W}_e$ é a matriz de covariância dos dados, μ_q é um escalar de ponderação do peso dos parâmetros de escolha e, finalmente, \mathbf{W}_q é a matriz de peso que introduz informação a priori (física, matemática ou geológica) de acordo com o vínculo escolhido. O primeiro termo da expressão impõe ajuste aos dados enquanto o segundo impõe características da distribuição de corrente, \mathbf{q} , que é procurada no problema inverso.

Como o número de estações é menor que o número de nós da malha ($m < n$), o problema assim formulado é do tipo sub-determinado fazendo com que minimização do funcional \mathcal{Q} não possa ser obtida com unicidade a menos que informação a priori seja introduzida. Pela teoria da regularização (Tikhonov e Arsenin, 1977) a introdução de informação a priori é feita por meio de *funcionais regularizadores*, incorporados por meio de formas quadráticas envolvendo os parâmetros desconhecidos.

Genericamente podem-se resumir as ponderações no espaço dos parâmetros definindo

$$\mu_q \mathbf{W}_q = \sum_{i=1}^n \mu_i \mathbf{W}_i, \quad (1.30)$$

sendo $\mu_i \mathbf{W}_i$ as matrizes ponderadas que caracterizam os diferentes vínculos. A solução que minimiza o funcional na equação 1.29 é dada por

$$\hat{\mathbf{q}} = \mathbf{W}_q^{-1} \mathbf{R}^T (\mathbf{R} \mathbf{W}_q^{-1} \mathbf{R}^T + \mu \mathbf{W}_e^{-1})^{-1} \mathbf{u}_o. \quad (1.31)$$

Diversos funcionais regularizadores tem sido utilizados na inversão de dados de potencial espontâneo, entre eles os que impõem Vínculo de Suavidade (VS), Sensibilidade Acumulada (VSA), Inverso da Profundidade (VINP), Inversão Compacta (IC) e Vínculo de Eletroneutralidade (VE), comentados a seguir.

1.5.1 Vínculo de Suavidade (VS)

O vínculo de suavidade implementa a condição que a norma euclidiana dos parâmetros desconhecidos seja mínima. Isto implica em minimizar $\|\mathbf{q}\|_2$ garantindo que $\|\mathbf{u}_o - \mathbf{u}_c\|_2 = \varepsilon$, sendo ε um parâmetro que mede o ajuste entre dados medidos \mathbf{u}_o e calculados \mathbf{u}_c , $\mathbf{u}_c = \mathbf{R}\mathbf{q}$ e que normalmente depende do nível de ruído nos dados. A condição de norma mínima faz com que os valores q_i no somatório $\sum q_i^2$ tendam a valores próximos a zero e, dessa forma, valores próximos entre si. Esta imposição de proximidade gera distribuições com aparência suave, já que a variação entre parâmetros adjacentes é pequena. A inversão com vínculo de suavidade define uma matriz de peso $\mathbf{W}_q = \mathbf{I}_n$ sendo \mathbf{I}_n a matriz de identidade de ordem n . Por outro lado, ao impor condições de suavidade, o VS produz imagens “borradas”, sem definição de contrastes abruptos. A matriz \mathbf{W}_e é igual à matriz de identidade.

1.5.2 Vínculo de Sensibilidade Acumulada (VSA)

O vínculo de sensibilidade acumulada VSA (Minsley, Sogade e Morgan, 2007b) tem como objetivo evitar soluções contendo elementos não nulos na superfície do meio em que as medições

foram tomadas. O vínculo consiste em penalizar distribuições com fontes de corrente na vizinhança dos pontos de medida definido uma matriz diagonal de pesos, \mathbf{W}_{sa} , com elementos

$$\{\mathbf{W}_{sa}\}_{kk} = \left(\sum_{j=1}^m R_{jk}^2 \right)^{-1} \quad (1.32)$$

sendo R_{kj} o elemento k, j da matriz \mathbf{R}_{ref} , na equação 1.28.

A matriz de peso \mathbf{W}_{sa} contém elementos que são iguais ao inverso da sensibilidade do parâmetro, isso porque

$$R_{jk} = \frac{\partial \mathbf{u}_c}{\partial q_k}, \quad (1.33)$$

é por definição o coeficiente de sensibilidade em um problema linear.

A incorporação do VSA leva a uma diminuição da sensibilidade se o parâmetro da malha de discretização estiver distante da superfície. Na formulação do funcional do VSA \mathbf{W}_e é a identidade, assim como no VS e $\mathbf{W}_q = \mathbf{W}_{sa}$.

1.5.3 Vínculo do Inverso da profundidade (VINP)

O vínculo do inverso da profundidade (Li e Oldenburg, 1998) também tem como objetivo penalizar soluções com termos de corrente muito próximos da superfície, favorecendo soluções que exibem fontes em maior profundidade. Para tanto, o vínculo considera que soluções apenas com distribuições superficiais são desprovidas de significado físico, implicitamente assumindo que os processos envolvendo o fluxo de massa não se restringem à superfície do solo. A matriz diagonal de pesos, \mathbf{W}_{vinp} , que implementa este vínculo é montada com elementos

$$\{\mathbf{W}_{vinp}\}_{ii} = \frac{1}{z_i}, \quad (1.34)$$

sendo z_i a profundidade do centro da i -ésima célula do modelo de resistividade. O VINP força a minimização do termo $\sum q_i^2/z_i$ fazendo os termos q_i com $z_i \approx 0$ (próximos da superfície) serem nulos. A inversão com VINP define matrizes $\mathbf{W}_q = \mathbf{W}_{vinp}$ e $\mathbf{W}_e = \mathbf{I}$ e parâmetro $\mu_e = 1$.

1.5.4 Escolha do Parâmetro de Regularização

A curva-L (Hansen e O'Leary, 1993) é um critério para a escolha do fator de regularização μ e consiste de um gráfico apresentado em escala bilogarítmica, no qual o eixo das abscissas corresponde ao módulo da diferença entre a anomalia observada e calculada, resíduo $\|\mathbf{r}\|_2$ e o eixo das ordenadas ao módulo $\|\mathbf{q}\|_2$ dos parâmetros estimados. A equação 1.31 é resolvida para vários valores de μ e cada solução gera um par $\|\bar{\mathbf{q}}\|_2$ e $\|\bar{\mathbf{r}}\|_2$. A escolha de um ponto determina na curva a solução escolhida, obedecendo ao critério de ajuste e norma dos

parâmetros. Conforme a concepção do critério a melhor solução estará localizada no ‘cotovelo’ da curva-L. A análise da curva-L, torna também possível observar como a minimização excessiva da norma dos parâmetros pode desajustar os dados.

Tal como mostra a Figura 1.3, o conjunto de soluções obtido com vários valores de μ define uma curva com forma de ‘L’. O cotovelo da Curva-L determina o valor de μ que minimiza $\|\mathbf{q}\|_2$ ao mesmo tempo garantindo um ajuste satisfatório. Valores maiores de μ a partir do ‘cotovelo’, minimizam excessivamente a norma dos parâmetros comprometendo o ajuste dos dados.

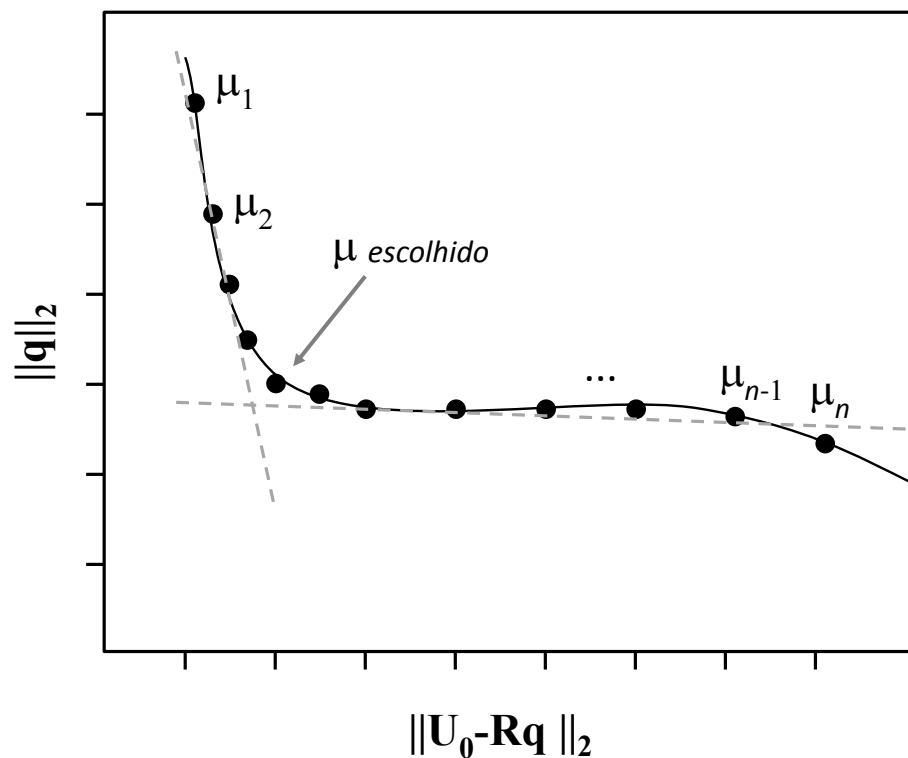


Figura 1.3: Curva-L; o ponto de inflexão da curva (“cotovelo”) assinala o valor adequado para o parâmetro de regularização.

1.5.5 Inversão Compacta (IC)

O funcional que implementa o que se denomina *Inversão Compacta* (Last e Kubik, 1983; Minsley, Sogade e Morgan, 2007b), utiliza matriz de pesos que dependem dos parâmetros a serem determinados, o que imprime uma relação de não-linearidade ao funcional a ser minimizado. A solução é obtida em um processo iterativo, no qual a estimativa $\hat{\mathbf{q}}^{(k)}$ dependerá da solução $\hat{\mathbf{q}}^{(k-1)}$, obtida na iteração anterior, sendo k o número da iteração. Sendo

não-linear, o algoritmo requer uma solução inicial \mathbf{q}^0 , normalmente a solução obtida com vínculo de suavidade (VS). Outro parâmetro exigido pela inversão compacta denomina-se *parâmetro de congelamento*, fornecido pelo intérprete, que define o valor limite (máximo) para os parâmetros desconhecidos.

Para dados de gravimetria, para os quais a inversão compacta foi desenvolvida (Last e Kubik, 1983), o parâmetro de congelamento é o contraste de densidade associado à estrutura de interesse. Na inversão de dados de potencial espontâneo o vínculo da compactidade foi introduzido por (Minsley, Sogade e Morgan, 2007b; Minsley, Sogade e Morgan, 2007a).

Basicamente, a inversão compacta determina soluções $\hat{\mathbf{q}}^{(k)}$, tal que

$$\hat{\mathbf{q}}^{(k)} = \left[\mathbf{W}_q^{(k-1)} \right]^{-1} \mathbf{R}^T \left\{ \mathbf{R} \left[\mathbf{W}_q^{(k-1)} \right]^{-1} \mathbf{R}^T + \left[\mathbf{W}_e^{(k-1)} \right]^{-1} \right\}^{-1} \mathbf{u}_o \quad (1.35)$$

empregando matrizes de peso $\mathbf{W}_q^{(k-1)}$, atualizadas em cada iteração, dadas por

$$\left\{ \mathbf{W}_q^{(k-1)} \right\}_{jj}^{-1} = \begin{cases} \epsilon, & \text{se } q_j \geq b \\ \epsilon + [q_j^{(k-1)}]^2, & \text{se } q_j < b \end{cases} \quad (1.36)$$

sendo b o parâmetro de congelamento e $\mathbf{W}_e^{(k-1)}$ atualizada com valores muito pequenos (ϵ) da ordem de 10^{-16} . Tal como definido na equação 1.36, o peso na matriz diagonal \mathbf{W}_q , em todas as iterações k , faz com que a solução apresente muitos valores próximos de zero. Os elementos da matriz de peso são $\{\mathbf{W}_q\}_{jj} = 1/(q_j^2 + \epsilon)$ minimizando o termo

$$\mathbf{q}^T \mathbf{W}_q \mathbf{q} = \sum_{j=1}^m \frac{q_j^2}{q_j^2 + \epsilon}. \quad (1.37)$$

No congelamento o valor de q_j pode ser diferente de zero sempre que o valor estimado for menor que b . Desta forma, a minimização do funcional exige que um número mínimo de $q_j \neq 0$ seja alcançado, gerando assim uma distribuição com muitos valores nulos, que se denomina, *solução compacta*.

1.5.6 Condição de Eletroneutralidade

O vínculo de eletroneutralidade impõe

$$\sum \bar{q}_i = 0. \quad (1.38)$$

sendo q_i elementos do vetor dos parâmetros estimado.

A inclusão deste vínculo na inversão de PE foi realizada em modelagem na exploração mineral e teve como objetivo mapear as interfaces entre corpos mineralizados (Mendonça,

2008a). Mais tarde este vínculo foi também usado na obtenção de pontos de corrente em um experimento de laboratório (Mendonça, 2008b).

A solução que atende o vínculo de eletroneutralidade (Mendonça, 2008b) é dada por

$$\tilde{\mathbf{q}} = \hat{\mathbf{q}} - \frac{\mathbf{b}^T \hat{\mathbf{q}}}{\mathbf{b}^T (\mathbf{R}^T \mathbf{R})^{-1} \mathbf{b}} (\mathbf{R}^T \mathbf{R})^{-1} \mathbf{b} \quad (1.39)$$

em que \mathbf{b} é um vetor de elementos unitários, que torna $\mathbf{b}^T \mathbf{q} = 0$. A solução é $\hat{\mathbf{q}}$ obtida com a minimização do funcional \mathcal{Q} (equação 1.31).

1.5.7 Inversão Compacta para dados de PE

A IC tal qual desenvolvida por Last e Kubik (1983), foi aplicada a dados gravimétricos para localizar e estimar o volume de fontes anômalas numa secção vertical. As características essenciais do método estão em selecionar uma classe de soluções que ajusta os dados com uma distribuição espacialmente compacta de propriedade física, no caso gravimétrico, a densidade.

No âmbito da inversão de PE, a IC foi primeiro utilizada por (Minsley, Sogade e Morgan, 2007b), que desenvolveu o algoritmo para o mapeamento 2D de fontes de corrente e o aplicou ao mapeamento de fontes de corrente na vizinhança de um poço de bombeamento, adaptando o algoritmo, mais tarde, ao mapeamento 3D de fontes de corrente no estudo de uma área contaminada (Minsley, Sogade e Morgan, 2007a). De modo geral, a IC é útil para produzir soluções com muitos termos nulos e com poucos valores próximos a um valor limite pré-determinado. Apesar de os trabalhos levantados apresentarem formulações essencialmente semelhantes para a solução compacta, o algoritmo de Inversão Compacta implementado apresenta algumas particularidades.

No caso da inversão PE é necessária a compensação da profundidade para evitar o confinamento dos polos de corrente na superfície do terreno, pois uma distribuição superficial não tem significado geofísico. Para obter este resultado, a IC pode ser aliada ao VINP ou ao VSA. Além disso, os contrastes de propriedades ou atributos físicos a serem estimados, são positivos e negativos, surgindo daí a necessidade de uma estratégia que resguarde o sinal dos parâmetros estimados (**Passo 7** do algoritmo).

Como já descrito no Capítulo 1, a IC requer uma solução inicial no algoritmo de inversão já que o peso dos parâmetros da IC, equação 1.36, depende de uma estimativa dos parâmetros. No nosso algoritmo, o ponto de partida é a solução com Vínculo de Suavidade (VS). Assim, o peso dos parâmetros \mathbf{W}_q é igual à identidade e o peso no ajuste \mathbf{W}_e é o produto da matriz identidade por uma constante muito pequena, da ordem de 10^{-16} .

Durante as iterações, os elementos $\{\mathbf{W}_q\}_{jj}$ da matriz de pesos dos parâmetros estão

sujeitos a um fator limitante b da propriedade física (fator de congelamento) que é uma informação à priori necessária, e no caso da inversão PE, corresponde à amplitude máxima da intensidade de corrente. Definido o valor de b , o módulo do vetor de parâmetros \mathbf{q} é reavaliado a cada iteração, sendo o peso modificado localmente (diminui se $\mathbf{q} > \mathbf{b}$ ou aumenta se $\mathbf{q} \leq \mathbf{b}$). A matriz \mathbf{W}_e não é modificada durante o processo iterativo.

O processo de congelamento ocorre paralelamente à construção da matriz de peso dos parâmetros e consiste em atualizar o valor de $|q_i^{(k+1)}|$ (elemento do vetor de parâmetros na iteração corrente) com o valor de $|q_i^{(k)}|$ (iteração anterior), desde que este valor seja menor que o do fator de congelamento b . Caso contrário, $|q_i^{(k+1)}| = b \cdot (q_i^{(k)} / |q_i^{(k)}|)$, o que implica em um congelamento pontual da distribuição de parâmetros e garante que o valor do módulo dos parâmetros, $|q_i^{(k+1)}|$ nunca seja maior que b .

Apresentamos um quadro-resumo (abaixo) do algoritmo implementado nesta pesquisa e comentários sobre as principais diferenças entre a forma usada por Last e Kubik (1983) e Minsley e colaboradores (Minsley, Sogade e Morgan, 2007b).

Algoritmo de compacidade

Passo 1. Inicie $\mathbf{q}^{(k)}$, $k = 0$, com a solução $\mathbf{q}^{(0)}$, obtida com o Vínculo de Suavidade (VS)

Passo 2. Faça μ_e igual à razão sinal-ruído (estimada à priori) e $\epsilon \approx 10^{-16}$.

Passo 3. Atribua um valor limite, b , para a propriedade física e defina o número de iterações, n .

Passo 4. Inicie matrizes de peso $\mathbf{W}_q^{(k)} = \mathbf{I}_m$ (parâmetros) e $\mathbf{W}_e^{(k)} = \mu_e \mathbf{I}_n$.

Passo 5. Calcule $\mathbf{q}^{(k+1)} = \mathbf{W}_q^{(k+1)} \mathbf{R}^T (\mathbf{R} \mathbf{W}_q^{(k+1)} \mathbf{R}^T + \mu_e \mathbf{W}_e^{(k+1)})^{-1} \mathbf{u}_0$.

Passo 6. Aplique (ou não) a condição de neutralidade $\sum q_i = 0$.

Passo 7. Atualização dos pesos e congelamento dos parâmetros:

se $|q_i^{(k+1)}| < b$, o elemento da matriz de peso $w_{ii}^{(k+1)} = [q_i^{(k)}]^2 + \epsilon$

e o parâmetro $q_i^{(k+1)} = q_i^{(k)}$

se $|q_i^{(k+1)}| \geq b$, o elemento da matriz de peso $w_{ii}^{(k+1)} = \epsilon$

e o parâmetro $q_i^{(k+1)} = b \cdot (\text{sinal de } [q_i^{(k)}])$

Passo 8. Calcule o resíduo $\mathbf{e}^{(k+1)} = \mathbf{u}_0 - \mathbf{R} \mathbf{q}^{(k+1)}$ e a variação $\Delta \mathbf{q}^{(k+1)} = \mathbf{q}^{(k+1)} - \mathbf{q}^{(k)}$

Passo 9. se $k = n$ fim, senão, $k = k + 1$ vá para **Passo 5**

As principais contribuições na implementação do algoritmo estão relacionadas à imposição da condição de Eletroneutralidade (Mendonça, 2008a), **Passo 6**, que faz com que a soma dos termos de corrente obtidos pela inversão seja nula e pela modificação do congelamento, **Passo 7**, para que se possa resguardar o sinal da solução, garantindo fontes de

corrente positivas e negativas.

A escolha da melhor solução leva em conta o número de iterações n e o ajuste dos dados. O número de iterações deve ser grande o suficiente para garantir a compacidade da solução. A compacidade é alcançada quando apenas poucos pontos da malha recebem fontes não nulas. Um ponto importante a ser considerado é o efeito da escolha do parâmetro b sobre o aspecto da solução, um valor pequeno para b implica em uma solução de maior volume e um valor de b sobrestimado uma solução de menor volume, sendo que essas compensações se dão a fim de garantir o ajuste dos dados.

1.5.8 Vínculo de Contraste (VC)

Tanto em problemas de exploração mineral, quanto ambientais são previstas situações nas quais as fontes de corrente podem estar distribuídas em interfaces. O mapeamento de fontes de corrente através da inversão de dados PE representa desta forma, um problema real a ser estudado. Os vínculos de inversão já conhecidos, ver Capítulo 1, introduzem vários tipos de informação a priori, mas, nenhum destes vínculos favorece soluções em interfaces.

Nesta seção, apresentamos um novo tipo de vínculo que tem por objetivo favorecer soluções em interfaces, ou seja, na vizinhança de regiões com contraste de condutividade elétrica. O objetivo do vínculo de contraste na inversão de PE é fazer com que os pontos de corrente obtidos, sejam colocados nos locais com gradiente de resistividade/condutividade. Para obter este resultado, construímos uma matriz de peso dos parâmetros que leva em conta a informação contida no modelo de resistividade. Vale a pena lembrar, que o modelo de resistividade é requerido como informação de entrada na inversão PE e utilizado no cálculo da matriz de sensibilidade. Desta forma, o vínculo de interface utiliza informações já utilizadas na inversão de PE.

Os elementos da diagonal da matriz de peso $\{\mathbf{W}_{vc}\}_{ii}$ são definidos elemento a elemento como o inverso do quadrado dos contrastes de resistividade $\Delta\sigma_i$ acumulados nas células vizinhas à célula da malha que está sendo avaliada. Alguns problemas numéricos podem ocorrer em regiões onde não há contraste de resistividade, ou seja, regiões localmente homogêneas, pela tentativa da divisão por zero. Para evitar este problema, aos pesos w_{ii} referentes à partes da malha sem variação de resistividade, adiciona-se um valor ϵ muito pequeno, da ordem de 10^{-16} . Assim, conforme a malha é varrida, os pontos da malha numerados $i = 1, 2, \dots, n$, excetuando-se as células das bordas, serão avaliados obtendo os elementos

$$w_{ii} = \frac{1}{(\sum \Delta\sigma_i^2) + \epsilon^2} \quad (1.40)$$

da matriz de peso dos parâmetros.

O cálculo de $\Delta\sigma_i$ pode ser ilustrado observando um caso particular mostrado na Figura 1.4, que mostra uma malha discreta com n células de resistividade. A célula a ser avaliada

para ilustrar o cálculo do elemento de peso é a célula na posição $i = 16$. A célula que tem seu peso computado e sua vizinhança estão em destaque na figura e o sentido de cálculo do módulo das diferenças é o horário. Assim, temos que os $\sum \Delta\sigma_i$ no denominador da equação 1.40 é $\sum \Delta\sigma_{16} = |\sigma_9 - \sigma_{10}| + |\sigma_{10} - \sigma_{11}| + |\sigma_{11} - \sigma_{17}| + |\sigma_{17} - \sigma_{23}| + |\sigma_{23} - \sigma_{22}| + |\sigma_{22} - \sigma_{21}| + |\sigma_{21} - \sigma_{15}| + |\sigma_{15} - \sigma_9|$ para a célula $i = 16$. Para células na borda da malha, fazemos $w_{ii} = 0$.

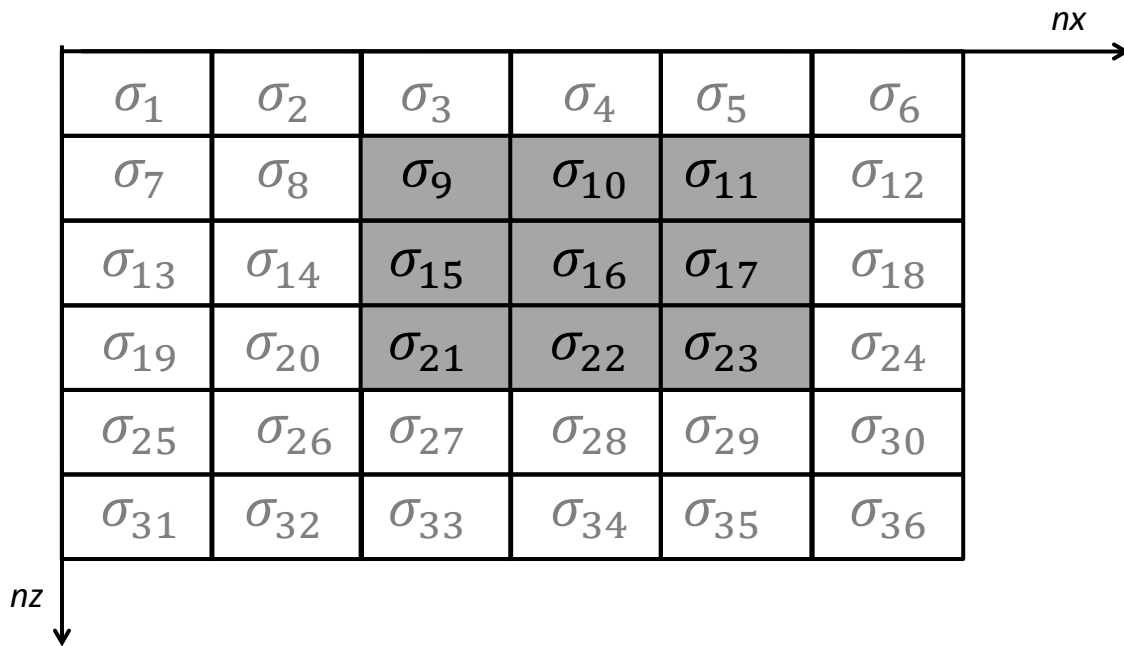


Figura 1.4: Vínculo de contraste: quadro esquemático representando a forma como as variações nas células vizinhas influem no cálculo do peso da célula que está sendo avaliada (no caso, $i = 16$). Os valores σ_i representam o valor de condutividade de cada célula.

CAPÍTULO 2

Testes de Bombeamento: Parte Experimental

O potencial espontâneo de origem eletrocinética pode ser medido em campo como resultado do gradiente de pressão induzido por testes de bombeamento (Bogolovsky e Ogilvy, 1972). A retirada de água em um poço resulta em um polo de corrente que é proporcional à vazão da água e as heterogeneidades do meio, criando uma distribuição secundária de corrente. Minsley, Sogade e Morgan (2007b) discutem a possibilidade de conduzir ensaios de bombeamento para mapear essas descontinuidades no que se denomina *imageamento hidrogeológico*. Testes de campo mostram que o potencial eletrocinético é mensurável em condições de campo (Bogolovsky e Ogilvy, 1972) e procedimentos de interpretação tem sido propostos (Rizzo, Suski, Revil, Straface e Troisi, 2004; Titov, Revil, Konosavsky, Straface e Troisi, 2005; Mainault, Strobach e Renner, 2008). Glover e Jackson (2010) simularam em computador a resposta do avanço da frente de água quando um reservatório de petróleo é bombeado, sugerindo que este avanço seria perceptível para um conjunto de eletrodos instalados ao longo de um poço. A possibilidade de mapear descontinuidades em um meio poroso utilizando bombeamento em poços e medidas geofísicas representam uma importante ferramenta na caracterização de reservatórios (água e hidrocarbonetos), o que demanda o desenvolvimento de metodologias para a interpretação de dados.

Silva (2011) realizou testes de simulação em tanque nos quais potenciais eletrocinéticos foram medidos em resposta à injeção/extração de água no meio, comparando os resultados com potenciais elétricos causados por fontes artificiais de corrente. Neste trabalho aplicamos o procedimento desenvolvido por Silva (2011), modificando apenas o estágio inicial de preparação da amostra. Na abordagem anterior, a água de residência que saturou o meio poroso foi substituída regularmente por água deionizada para manter a resistividade da água em um valor que realçava a amplitude do sinal (aproximadamente $500 \Omega\text{m}$). A desvantagem é que, com o tempo de residência da água no meio, a resistividade da água não permanecia constante, comprometendo a comparação de resultados obtidos em períodos distintos. Na abordagem que usamos a água foi mantida em circulação até que não fosse mais percebida mudança significativa de resistividade. Para compensar a diminuição de amplitude do sinal, os parâmetros de aquisição (taxa de bombeamento, tempo de aquisição) tiveram que ser redimensionados. A parte experimental foi dividida em duas fases, a primeira com medidas em amostras cilíndricas (ou em plug) e a segunda com a simulação propriamente dita de

testes de bombeamento. No final deste Capítulo os dados aqui apresentados são interpretado qualitativamente e nos subseqüentes re-interpretados por meio de modelagem de fluxo (Capítulo 3) e modelagem inversa (Capítulo 4).

2.1 Medidas em Amostra

Medições em amostras cilíndricas foram realizadas para determinar as propriedades físicas do meio (resistividade elétrica, permeabilidade hidráulica) e estimar o parâmetro de acoplamento eletrocinético em testes de percolação. A amostra com 30,07mm de comprimento e 25,70mm de diâmetro foi retirada com broca de diamante da placa porosa, revestida com tubo de PVC de 1" e instalada em um porta-amostra especialmente desenvolvido para medições de propriedades elétricas e hidráulicas. O porta-amostra foi usinado em polímero de alta densidade, com câmaras em cada extremidade da amostra e conectores para a circulação de água e eletrodos para as medições elétricas. A configuração em câmaras permite a circulação de água através do meio poroso, pois no encapsulamento dentro do tubo de PVC a amostra foi selada com resina epóxi. Na extremidade das câmaras dois eletrodos de aço inox são instalados para passagem de corrente elétrica nas medições de resistividade. Dois eletrodos de Ag-AgCl são instalados para medidas de potencial, por conectores (bucins) na porção superior da câmara, nos limites da amostra porosa. Medidas de potencial elétrico foram realizadas com um multímetro U1252A-Agilent com impedância interna maior que $100M\Omega$, operando no modo de medida de tensão, com fundo de escala de 1,5V. Medidas de corrente foram realizadas com um segundo multímetro com as mesmas especificações, só que operando no modo de corrente (fundo de escala de 1mA). A condutividade/resistividade elétrica da solução foi medida com um condutivímetro de bancada SevenEasy-Metler Toledo, sensor inLab 720. Propriedades físicas da água, densidade e viscosidade dinâmica, foram determinadas a partir de valores tabelados em função da temperatura (Lide, 2005).

2.1.1 Acoplamento eletrocinético

O esquema de medidas na Figura 2.1 permite a determinação do parâmetro de acoplamento eletrocinético, a partir da medição do potencial elétrico que se estabelece em resposta a um gradiente de pressão. A figura esquemática do aparato experimental mostra um barrilete de água conectado ao porta-amostra por uma mangueira de silicone, que força o escoamento da água pela amostra à medida que o barrilete é elevado em alturas $\Delta H = 50, 40, 30, 20, 10$ (cm), com posições de descanso ($\Delta H = 0$) no início e fim de cada ciclo de medidas. Os eletrodos de potencial (Ag-AgCl) nas terminações do meio poroso são conectados a um voltímetro de alta impedância (U1252A-Agilent) para registrar valores de potencial correspondentes a cada valor de ΔH . O voltímetro é conectado a um computador, com registro

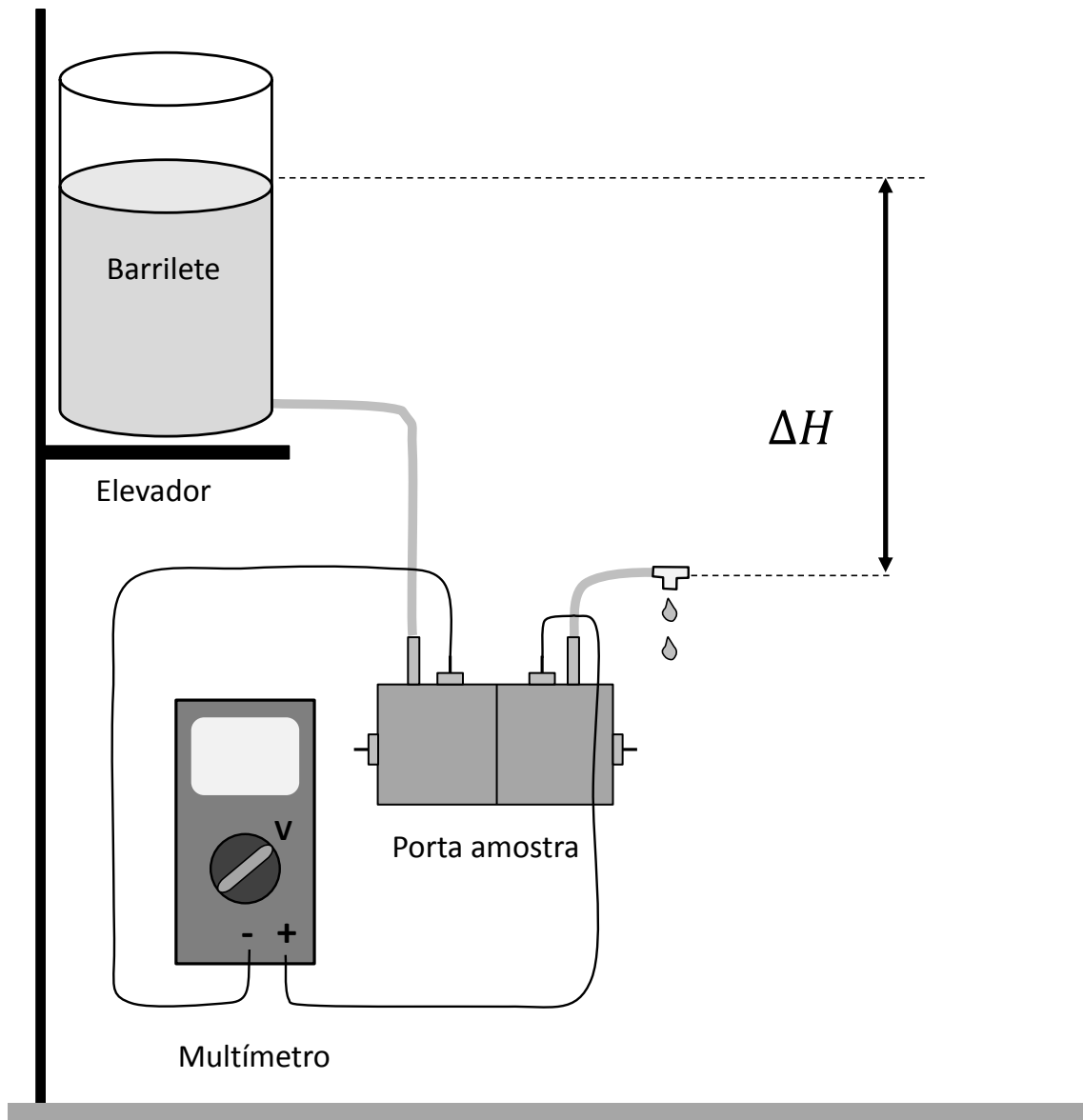


Figura 2.1: Esquema de medida do potencial eletrocinético em função da carga hidráulica, ΔH . A altura da coluna é estabelecida por um reservatório (barrilete) instalado em um elevador. Um voltímetro conectado a eletrodos (Ag-AgCl) instalados nos terminais da amostra registra valores de potencial a cada 1s, por cerca de 60s, em cada altura do barrilete.

de leitura a cada 1s, com 60s de registro em cada elevação do barrilete. Os valores em $\Delta H = 0$ são utilizados para estimar a deriva instrumental, de um modo geral inferior ao erro de medida. Uma vez registrados, os valores de potencial são selecionados, cada patamar correspondente a uma elevação específica, com valores médios e erros de medida determinados em programa escrito em MATLAB. A Figura 2.2 apresenta o potencial elétrico medido para $\Delta H = 0, 50, 40, 30, 20, 10, 0$ cm, com patamares bem definidos para cada elevação. A seleção de patamares e correspondentes valores de ΔH permite determinar o parâmetro de

acoplamento electrocinético C tal como ilustra a Figura 2.3.

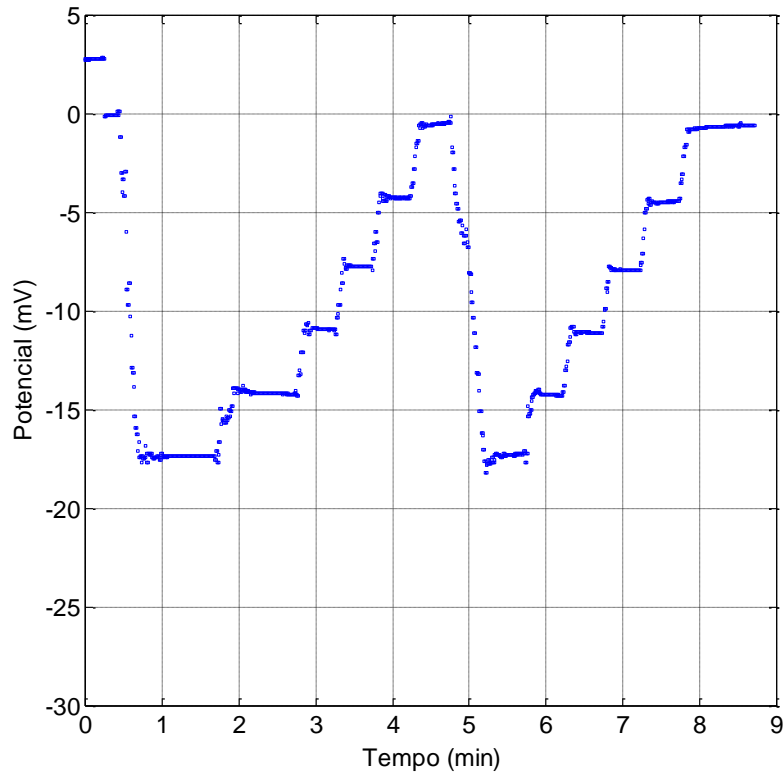


Figura 2.2: Potencial electrocinético em função das alturas ΔH de 0, 50, 40, 30, 20, 10, 0cm, em dois ciclos de medição. Cada patamar corresponde a uma altura do barrilete. O tempo de registro em cada altura é da ordem de 60 s. Resistividade da água de 146 Ωm .

O coeficiente de acoplamento C é obtido através da relação $C = \Delta\Phi/\Delta H$, expresso em mVm^{-1} (Ishido e Pritchett, 1999; Morgan, Williams e Madden, 1989). Uma vez obtido C é possível calcular o parâmetro de acoplamento electrocinético L (equação 1.3), pela relação

$$L = -\frac{\sigma C}{\rho_w g} \quad (2.1)$$

σ a condutividade elétrica em Ωm , ρ_w a densidade da água e g a constante gravitacional (ms^{-2}).

2.1.2 Resistividade elétrica

O mesmo encapsulamento da amostra permite a medição de resistividade do meio. Tal como mostra a Figura 2.4, o porta-amostra é conectado a uma fonte de corrente externa, alimentada por uma bateria. Dois multímetros são utilizados, um operando como voltímetro para medir o potencial elétrico resultante da corrente aplicada, outro no modo de amperímetro

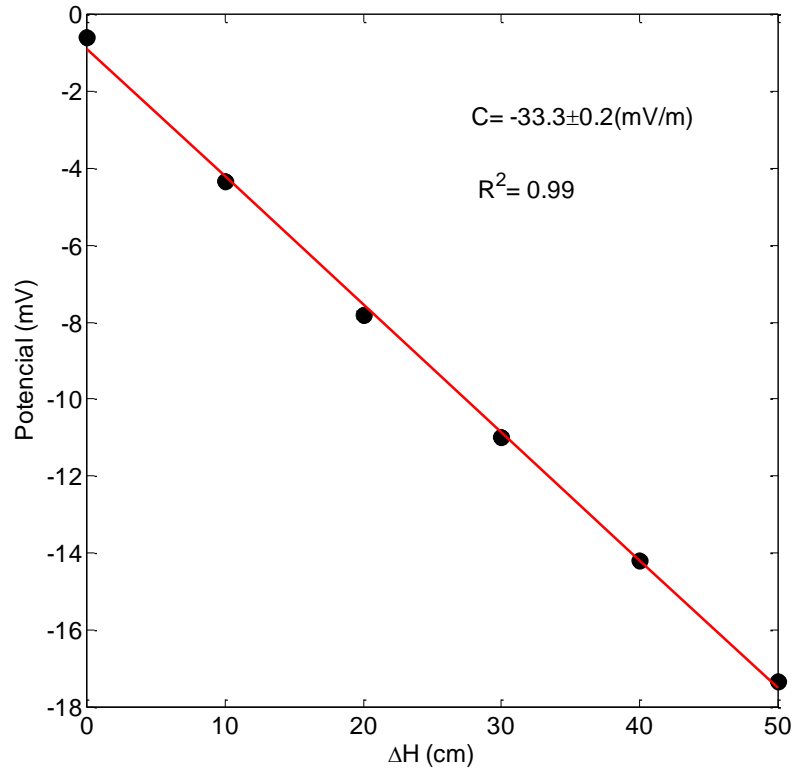


Figura 2.3: Gráfico do potencial eletrocinético em função da carga hidráulica ΔH . Dados experimentais (círculos cheios) e reta ajustada por regressão linear (linha vermelha). O coeficiente angular da reta fornece o coeficiente de acoplamento eletrocinético C .

para medir a corrente que circula pelo meio. Os dois voltímetros são sincronizados e conectados a um computador para operar como data-logger, com registros a cada 100 ms. A corrente injetada apresenta pelo menos cinco níveis ajustados manualmente através de um potenciostato (resistor de resistência variável). A forma de corrente aplicada ao sistema tem forma quadrada, com estágios de ligado-desligado-reverso-desligado, cada estágio com duração de 2 s.

A Figura 2.5 ilustra as séries temporais de corrente e potencial medidas com este procedimento. Os dados assim registrados são usados para calcular a resistência elétrica da amostra. Este procedimento é ilustrado na Figura 2.6, com gráfico dos pares de corrente e potencial, obtidos dos patamares das séries temporais de corrente e de potencial. O coeficiente angular da reta que ajusta esses pares fornece a resistência elétrica, R , da amostra. Conhecendo as dimensões da amostra, calcula-se a resistividade ρ do material pela relação

$$\rho = R \frac{A}{l}, \quad (2.2)$$

sendo R a resistência elétrica, A a seção (m^2) da amostra e l seu comprimento (m). Considerando $R = 147039.6 \, \Omega$, $A = 50,247 \times 10^{-5} \, \text{m}^2$, $l = 2,53 \times 10^{-2} \, \text{m}$ a resistividade da

amostra é de $\rho = 2422\Omega\text{m}$ com a resistividade da água de $146\Omega\text{m}$.

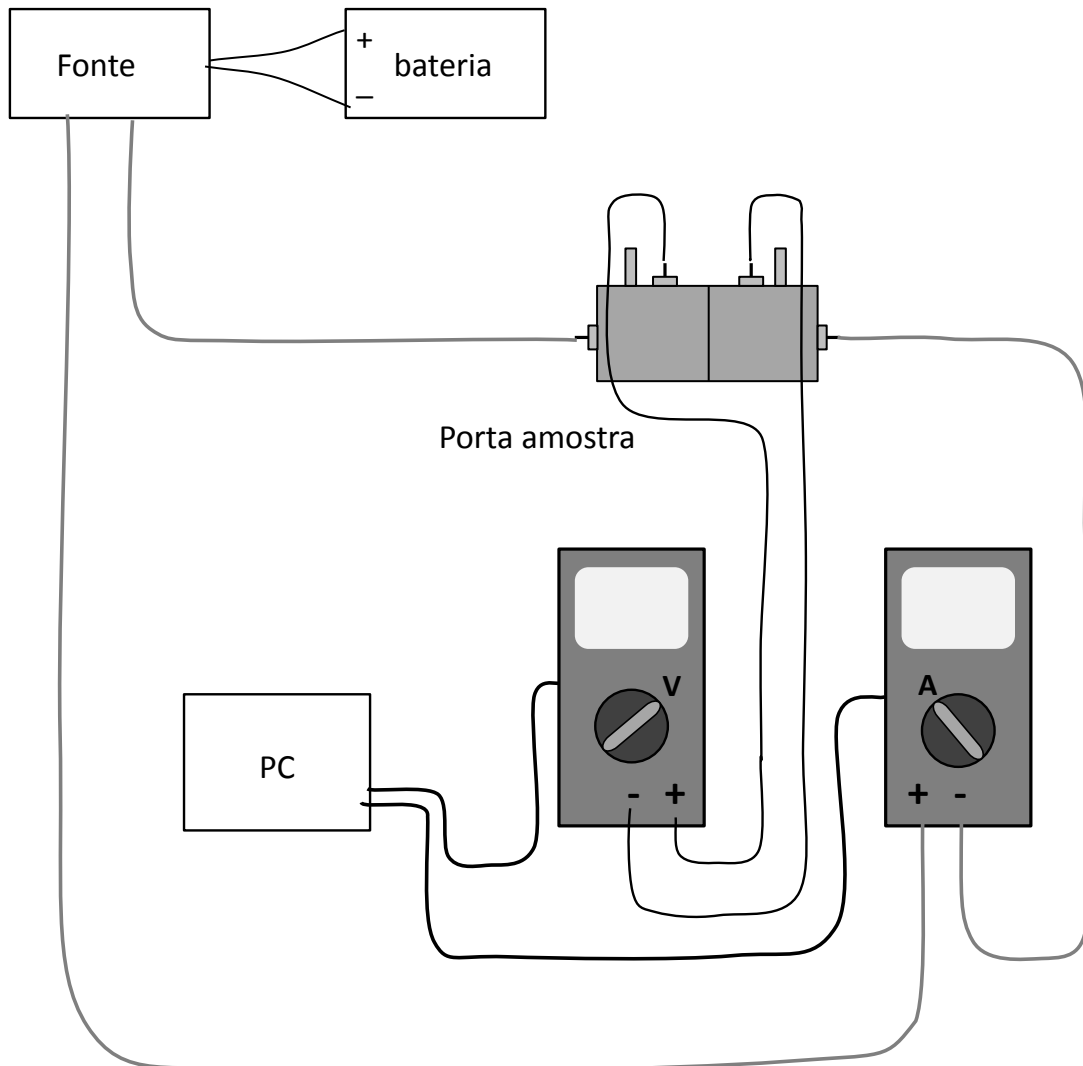


Figura 2.4: Esquema de medida para o potencial elétrico resultante da passagem de corrente por uma amostra cilíndrica de rocha. Multímetro operando no modo de medição de potencial (V) e de corrente (A) funcionam como dataloggers conectados a um PC. Os dados registrados são utilizados no cálculo da resistividade elétrica da amostra.

2.1.3 Permeabilidade hidráulica

Medidas de permeabilidade hidráulica foram realizadas pelo Laboratório de Petrofísica do Observatório Nacional (<http://www.on.br/>). Segundo a descrição presente no relatório, a porosidade e a permeabilidade foram medidas sob pressão de confinamento de 1000 psi

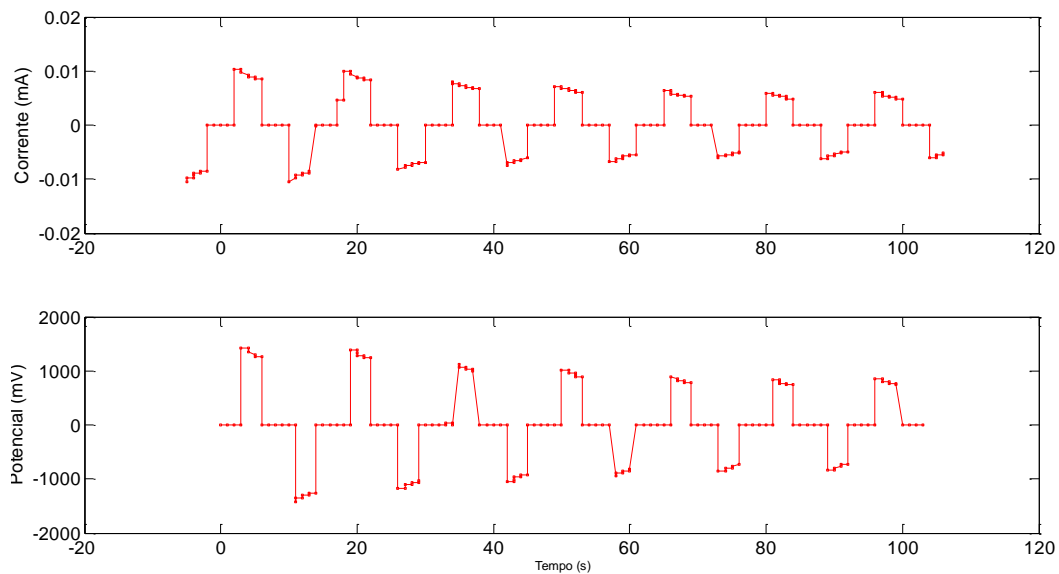


Figura 2.5: Registro de corrente e de potencial para determinação da resistividade elétrica da amostra. Série temporal da corrente (acima) e do potencial (abaixo). Água de poro com resistividade de $146 \Omega\text{m}$.

(68 atm) e temperatura de 22°C , respectivamente, num porosímetro de expansão a gás (nitrogênio), Ultrapore 300 e permeabilímetro digital, UltraPerm 500, ambos da Core Lab.

O valor da permeabilidade obtido foi de $85,6\text{mD}$ e o valor da porosidade foi de $0,36476$ (36.476%).

2.2 Experimentos em Tanque

Para as medidas de potencial eletrocinético em laboratório, foi utilizado um tanque transparente com peça porosa fixada na parte interna do mesmo, sendo este tanque preenchido com água e os poros da peça porosa, totalmente preenchidos por água, ou seja, a peça foi saturada pelo fluido. Quanto ao fluxo de água que percolou o meio poroso durante o procedimento de medidas e que originou o potencial, foi produzido através da conexão do tanque à uma bomba de infusão de vazão controlada através de seringas e mangueiras.

O potencial elétrico foi medido no mesmo tanque, desconectando da bomba de infusão e conectando a uma fonte externa para injeção de corrente.

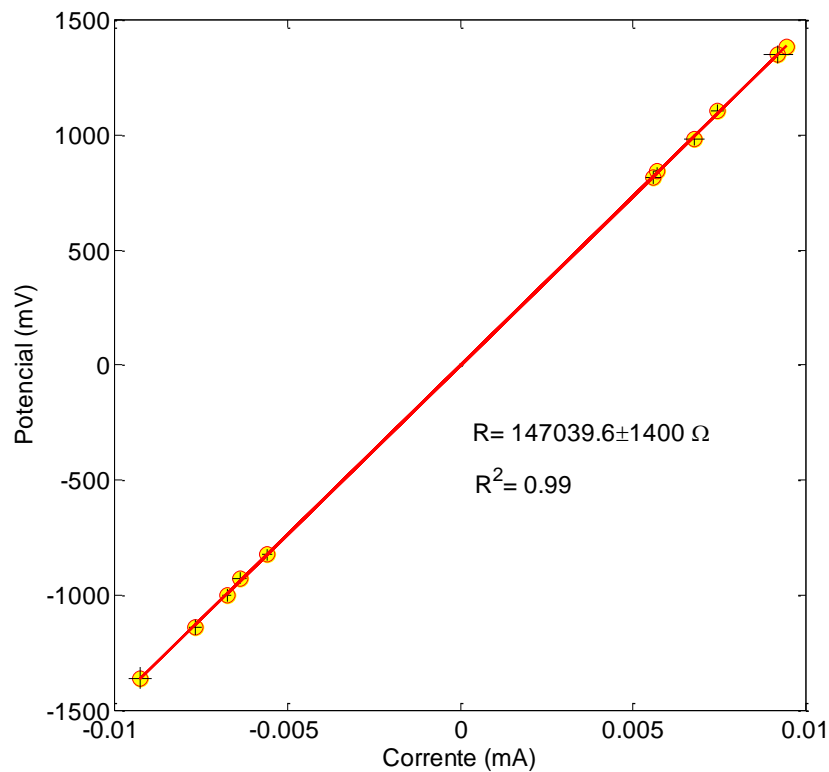


Figura 2.6: Potencial elétrico (mV) em função da corrente (mA) para uma amostra cilíndrica de rocha. Ajuste linear dos dados (linha vermelha) para determinar a resistência elétrica, R , a partir do coeficiente angular da reta.

2.2.1 Tanque de prova

O tanque de prova empregado neste trabalho resultou de diversas etapas construtivas e de materiais que são descritas em Silva (2011). A placa porosa foi produzida por sinterização de grãos de alumina (#320), segundo padrão utilizado na indústria de filtros cerâmicos. A pasta para sinterização teve composição de 75% de alumina, 20% de ligante cerâmico e 5% de ligantes orgânicos (amido de milho). O ligante cerâmico foi composto de esmalte vitrificado (60%), feldspato (25%) e outros (caulim, quartzo, dolomita, bentonita e argila). O processo aplicado permite a produção de um material bastante homogêneo, sem fissuras, com consistência sólida, porém poroso e permeável. Uma peça deste material, com dimensões de 26x10x3cm, foi instalada em uma cuba com placas acrílicas (espessura de 1cm), deixando câmaras com alturas de 4cm, no topo e na base do tanque. O contato da peça cerâmica com a placa de acrílico foi impermeabilizado com silicone. Para gerar uma descontinuidade do meio, com o objetivo de simular uma fratura, a placa porosa foi parcialmente serrada com serra de diamantes, deixando um rasgo de 0,3cm de largura e 5,0cm de extensão, na posição de 17,0cm. Ao longo do perfil, a 2,2cm do topo da peça porosa, foram perfurados 16 orifícios

(espaçamento de 1,5cm) com rosca para o encaixe de eletrodos de potencial conectados à cuba por conectores (bucim). Os eletrodos foram construídos com haste metálica de 5cm e esfera de 0,5cm de diâmetro na extremidade em contato com a água. Os eletrodos foram produzidos com liga, de prata de baixo teor em cobre, com posterior deposição eletrolítica de AgCl.

Para a injeção de água foram perfurados quatro furos cilíndricos (1cm de diâmetro, 3,0cm de comprimento) na altura de 4,0cm do topo da peça porosa, com coincidente perfuração no tanque. Nestes furos foram instalados espigões plásticos para conexão de mangueira, por sua vez, conectadas a uma bomba de injeção para simular poços de bombeamento. Na face posterior do tanque (a Figura 2.7 mostra a face frontal) eletrodos foram instalados para a injeção de corrente nos testes elétricos. Os furos foram nomeados A, B, C e D da direita para a esquerda conforme ponto de vista mostrado na Figura 2.7.

2.2.2 Procedimentos preliminares

O tanque foi preenchido com água deionizada com $500 \Omega\text{m}$, conectado entre barriletes (5 litros) e mantido em regime de circulação em circuito fechado (cuba-barrilete-cuba) por semanas. Bolhas de ar foram extraídas com seringas de 60 mL, conectadas nas diversas portas do tanque, de forma a garantir um regime de fluxo em condições de saturação. Medidas de resistividade elétrica da água (condutivímetro SevenEasy-Mettler Toledo, sensor inLab 720) foram tomadas diariamente nos barriletes de entrada e de saída e, ao final de três semanas, apresentou valor de $458,5 \pm 17.5 \Omega\text{m}$. A Tabela 2.1 mostra os valores de resistividade da água ao longo dos procedimentos de aquisição de dados.

Variação da resistividade da água			
Poços	Perfil(mV)	Data	Resistividade da água (Ωm)
AB	PE(1)	08/02/2012	476
	PE(2)	09/02/2012	470
	El		
BC	PE(1)	09/02/2012	470
	PE(2)	10/02/2012	468
	El		
CD	PE(1)	14/02/2012	442
	PE(2)	15/02/2012	441
	El		

Tabela 2.1: Resistividade da água (Ωm) no tanque de experimentação.



Figura 2.7: Aparato experimental para medições de potenciais elétricos e eletrocinéticos. Vista do tanque mostrando pontos C e D conectados à bomba de infusão (Nexus 3000/Chemyx) através de duas seringas de 60 mL acopladas em direções opostas. O mecanismo da bomba de seringa permite que os êmbolos das seringas se desloquem em direções opostas com igual velocidade. Fixando a velocidade de acionamento, e considerando o tamanho da seringa, pode-se programar a taxa de injeção (vazão). Na face oposta do tanque, nas mesmas posições com injeção/retirada de água, estão eletrodos para injeção (polo positivo) e retirada (polo negativo) de corrente.

2.2.3 Potencial Elétrico

O experimento consistiu na medida do potencial elétrico nos eletrodos de potencial, utilizando como referência o eletrodo localizado na extremidade oposta à fratura. Os eletrodos de medida foram enumerados de 1 a 15, o de número 1 situando-se ao lado do eletrodo de referência e o 15 na extremidade oposta. O mesmo conjunto de eletrodos de potencial foi usado nas medidas de potencial elétrico e potencial eletrocinético. Eletrodos para a injeção de corrente (A, B, C e D) foram instalados na face lateral do tanque oposta àquela com conexões para injeção e retirada de água nos testes de bombeamento.

O procedimento de medida para o potencial elétrico utilizou uma fonte de corrente que gera uma forma de onda quadrada, com intensidade regulada manualmente através de um potenciostato. Para uma mesma configuração de medida pelo menos cinco níveis de corrente foram aplicados.

Simultaneamente ao registro do potencial, outro multímetro monitorou a corrente injetada. Assim, para cada par de poços, uma fonte bipolar de corrente foi aplicada. A medição do potencial resultante gerou arquivos específicos para cada par de eletrodos de potencial que, quando processados, forneceu o perfil de potencial. Para efeito de ilustração, a Figura 2.8 mostra o potencial elétrico medido no eletrodo 8, em resposta a uma fonte bipolar de corrente, com intensidade variável, nos pontos A e B, o polo positivo em B, o negativo em A. Os arquivos com as séries temporais foram processados em um programa escrito em Matlab, onde os dados em patamares correspondentes (corrente e potencial) foram selecionados para computar valores médios e erros de medida. A Figura 2.9 ilustra os pares de corrente e de potencial para o eletrodo 8. O coeficiente angular da reta corresponde ao valor de resistência de transferência para a configuração de eletrodos considerada. Pela linearidade da Lei de Ohm, o valor numérico da resistência de transferência corresponde ao potencial elétrico que seria medido caso a corrente injetada fosse de 1 A. Por essa razão a modelagem numérica utilizando dados de resistência de transferência utiliza correntes nominais de 1 A (ou unitárias), mesmo considerando que correntes desta magnitude não foram utilizadas experimentalmente.

2.2.4 Potencial Eletrocinético

Como discutido no Capítulo 1, o potencial eletrocinético surge em resposta ao fluxo de água em um meio poroso. Para que um experimento em tanque produza este sinal em um nível mensurável é necessário garantir a repetibilidade do regime de fluxo e um dimensionamento adequado dos parâmetros de aquisição. Em nosso experimento, o controle do fluxo de água foi implementado com uma bomba de seringa programável, capaz de injetar e extrair a água com volume e vazão pré-determinados. Para a medida do potencial eletrocinético a peça porosa foi saturada com água e submetida a fluxos com vazão controlada por meio de uma bomba de infusão (Nexus 3000-Chemyx) conectada ao tanque por meio de mangueiras e espigões. Esta bomba permite a conexão de duas seringas com acionamento oposto (injeção e retirada), permitindo simular testes de bombeamento quando conectadas a um par de poços. A bomba foi previamente programada para ciclos de injeção e retirada com vazões de 70, 50, 55, 60, 65 e 70 mLmin⁻¹, em passos de 15 segundos de duração, cada passo envolvendo quatro operações. Para descrever, estas operações, vamos nos ater à seringa de injeção e por similaridade constatar que, para a seringa oposta, a resposta é inversa (ou seja: quando a primeira injeta, a segunda retira).

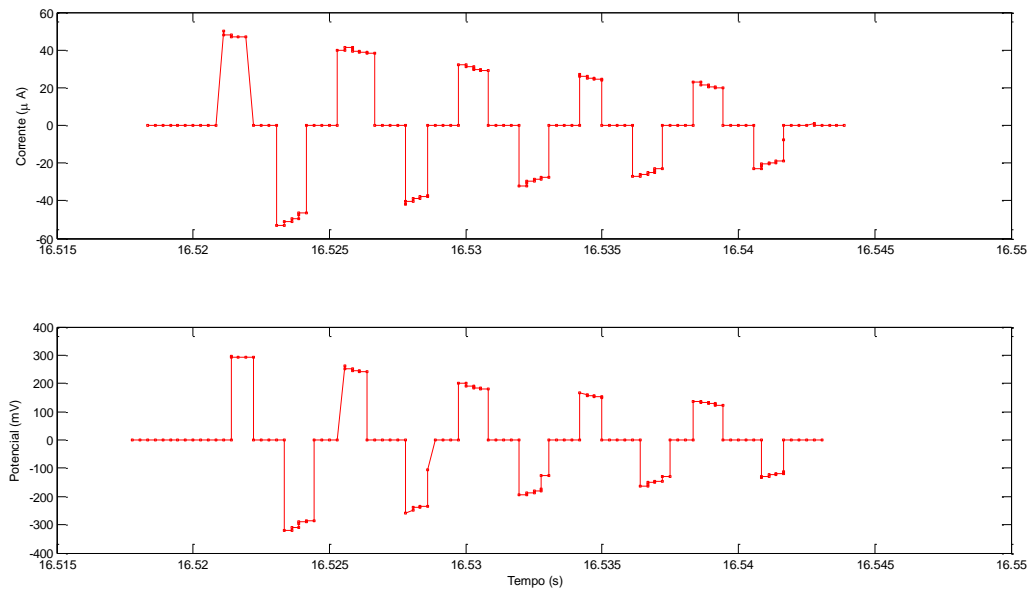


Figura 2.8: Pares de corrente e de potencial para a determinação da resistência elétrica de uma amostra. A resistividade elétrica é determinada utilizando este valor de resistência e medidas de comprimento e de seção transversal tomadas na amostra.

As operações para a seringa de injeção consistem de estágios de descanso-avanço-descanso-recuo. Quando a seringa da direita encontra-se no regime de "avanço" (injeção de água), a da esquerda atua no modo de "recuo" (retirada de água). Desta forma, os processos de injeção e retiradas são compensados e o volume total do fluido no circuito é constante.

Para a medida do potencial eletrocinético um voltímetro foi conectado a cada par de eletrodos de potencial, um ao longo do perfil, o outro (neutro) no eletrodo de referência (método da base fixa). Para varrer o perfil, a forma de onda na bomba de seringa teve que ser repetida para cada ponto de leitura de potencial. O registro para cada eletrodo foi feito durante dois ciclos de vazão programados, gerando séries tais como a mostrada na Figura 2.11. Nesta figura, cada "patamar" corresponde ao potencial elétrico que se observa quando a bomba de seringa atua com uma vazão predeterminada. Considerando que seis vazões foram programadas, para cada combinação de poços, 12 patamares são identificados. As séries temporais são posteriormente processadas por meio de seleção de patamares correspondentes e determinação do parâmetro de acoplamento eletrocinético.

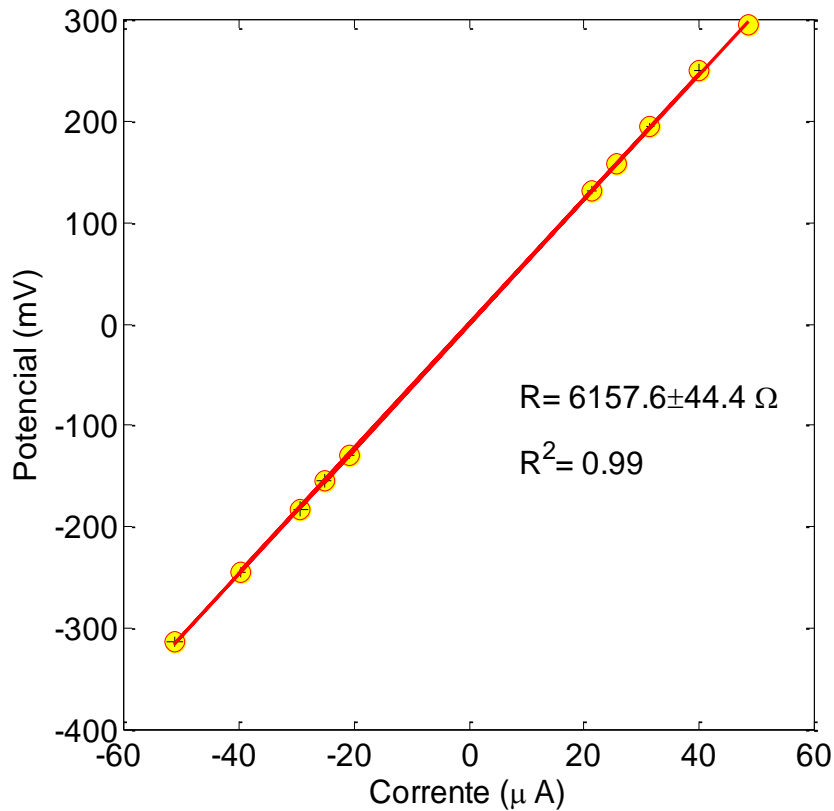


Figura 2.9: Potencial elétrico em função da intensidade de corrente, com pontos de injeção em A e B e medidas na estação 8 do perfil. Dados medidos (círculos em amarelo) e ajuste aos dados (vermelho). A grandeza R (coeficiente angular da reta) expressa a resistência de transferência para a medida em questão. Resistividade da água de poro de $470 \Omega\text{m}$.

2.3 Ilustração dos Procedimentos de Medida

O esquema adotado para a medida do potencial eletrocinético, quando o tanque é submetido à um fluxo de água e o esquema para as medidas do potencial elétrico, quando o tanque é submetido à injeção de corrente, ausente o fluxo de água no meio, são descritos a seguir.

2.3.1 Potencial Elétrico

As medidas de potencial elétrico consistem na definição de um par de eletrodos para a injeção de corrente e outro par para a leitura de potencial. Estabelecido o dipolo de corrente, o procedimento de medida é realizado em todas as estações ao longo do perfil repetindo-se para cada ponto no perfil um mesmo procedimento básico. Os pares de dipolos adotados no experimento foram AB, BC e CD e os perfis resultantes destas configurações são mostrados na

Figura 2.10. Os perfis apresentados foram multiplicados por uma constante de proporcionalidade (7.9347×10^{-4}), obtido por regressão linear, para que ficassem na ordem de mV e, assim, comparáveis com as amplitudes de potencial eletrocinético também medidas na peça.

Os perfis (Figura 2.10) descrevem uma curva crescente do lado onde está o polo positivo de corrente. É possível no entanto notar uma mudança na curvatura do perfil, que torna-se mais abrupto conforme o dipolo se afasta da estação de referência das medidas.

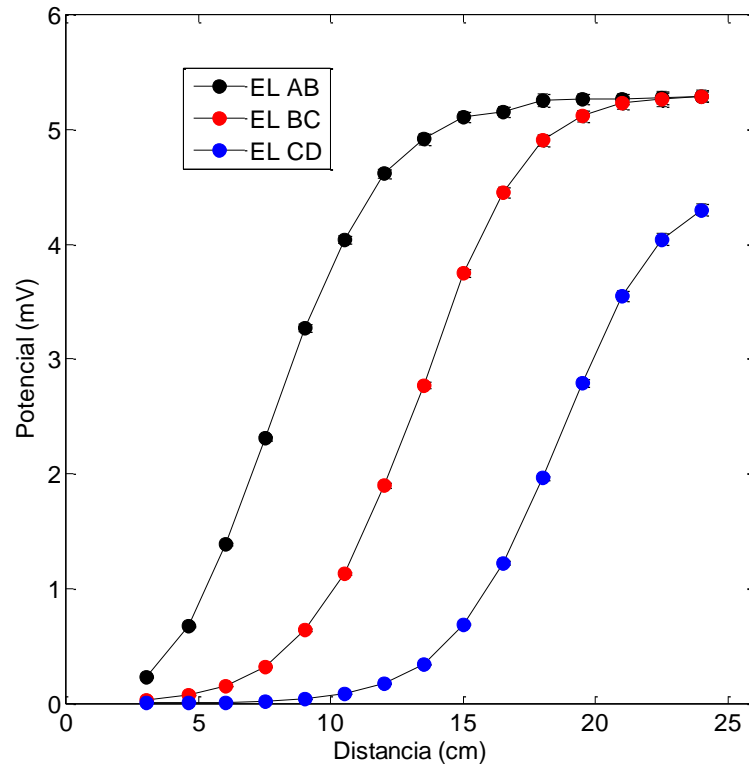


Figura 2.10: Potencial elétrico em resposta a uma fonte dipolar de corrente para injeção de corrente em A e em B (círculos em preto). Água de poro com resistividade de $470 \Omega\text{m}$. Perfil para injeção de corrente em B e C (vermelho), com resistividade da água de $468 \Omega\text{m}$. Perfil para os pontos de injeção de corrente em C e D (azul), com resistividade da água de $441 \Omega\text{m}$. Os potenciais foram multiplicados por $7,9347 \times 10^{-4}$ para garantir a mesma ordem de grandeza do perfil eletrocinético. Este fator de escala foi determinado por regressão linear do perfil elétrico com o eletrocinético.

2.3.2 Potencial Eletrocinético

As medidas de potencial eletrocinético consistem em aplicar uma forma de onda pela bomba de seringa, para uma dada combinação de pontos de injeção e retirada e ponto de medida ao longo do perfil. Um ciclo de operação da bomba, para uma dada combinação de poços (AB, BC ou CD), produz uma variação de potencial eletrocinético mostrada na Figura 2.11. Como a vazão da bomba foi programada, cada patamar da forma de onda pode ser associado à uma vazão específica. Para obter os efeitos somente da injeção ou retirada de água, corrigindo efeitos de deriva ou gradientes de concentração, calculamos a variação de potencial subtraindo de cada patamar o valor do potencial referente à bomba em estágio de descanso. Este procedimento minimiza os efeitos de deriva, observável pelo distanciamento do potencial de valor nulo, quando a bomba está no estágio de descanso.

A Figura 2.12a mostra o perfil de potencial eletrocinético medido em todas as estações, durante a injeção/retirada de água no poço AB, para a vazão de 60 mLmin^{-1} . A parte inferior da Figura, 2.12b, mostra os perfis de potencial eletrocinético para cada uma das vazões utilizadas no experimento, com ponto de injeção em A e retirada em B. Para todas as vazões, os perfis são similares em forma, apresentando uma amplitude diretamente proporcional à vazão. Para simplificar a descrição dos gráficos, utilizaremos os perfis correspondentes à vazão de 60 mLmin^{-1} , tanto na modelagem quanto na inversão dos dados.

2.4 Resultados Obtidos

Dispondo dos perfis de potencial elétrico e eletrocinético é possível fazer uma análise comparativa entre os sinais. A Figura 2.13 é um resumo de todo o trabalho experimental, e apresenta os perfis de potencial espontâneo e elétrico agrupando os resultados de acordo com a posição das fontes de corrente naturais e artificiais em AB (Figura 2.13a), BC (Figura 2.13b) e CD (Figura 2.13c). Os perfis elétricos estão multiplicados por um valor constante para que as anomalias elétricas fiquem comparáveis em amplitude às anomalias PE. O perfil elétrico para AB foi multiplicado por $7,9347 \times 10^{-4}$, para BC foi multiplicado por $2,7540 \times 10^{-4}$ e para CD, foi multiplicado por $3,0249 \times 10^{-4}$.

Uma informação quantitativa que pode tirar-se pela simples análise dos gráficos é que a correlação entre os perfis diminui quando as fontes naturais e artificiais dos potenciais estão nas proximidades de uma descontinuidade. Essa informação, acreditamos nós, pode ser um critério importante na identificação de descontinuidades do substrato quando aplicada em escala de campo, bastando apenas dispor de perfis de PE e de potencial elétrico.

Propomos assim, a sistematização de um processo qualitativo para identificação de descontinuidades baseada em levantamento conjunto de PE e potencial elétrico com arranjos

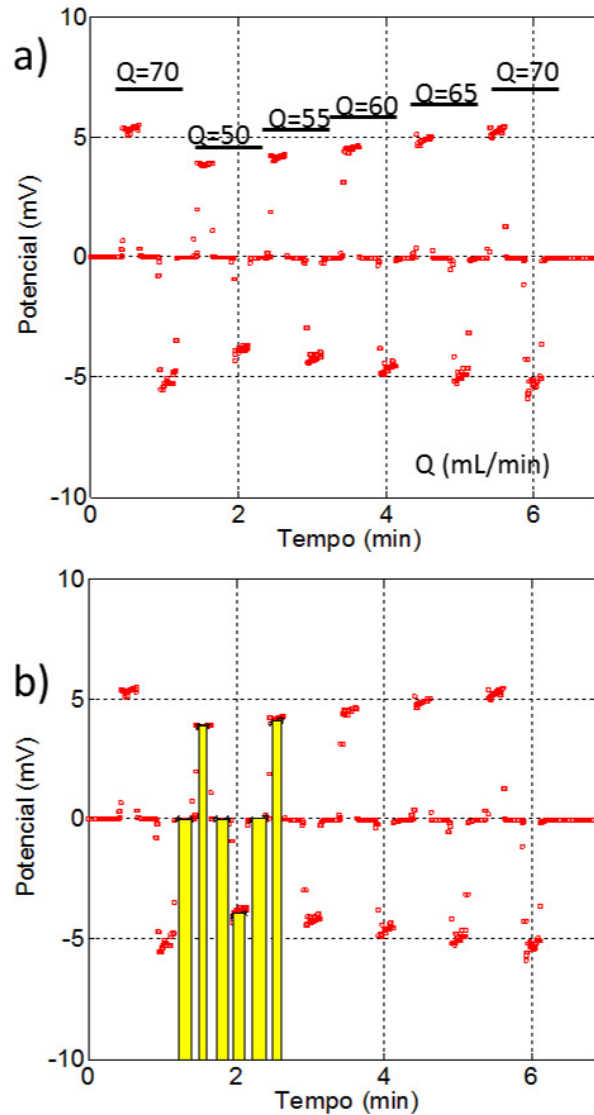


Figura 2.11: Aquisição de dados de potencial eletrocinético para diferentes vazões (medido no eletrodo 8 do perfil): a) série temporal com vazões pré-determinadas, cada ciclo com passos de 15s incluindo: descanso, injeção em B/retirada em A, descanso, injeção em A/retirada em B. Este ciclo é repetido para as vazões de 70, 50, 55, 60, 65 e 70 mLmin^{-1} ; b) patamares de potencial assinalando intervalos (amarelo) usados para a tomada de valores médios e desvio padrão. O ciclo de injeção em B com retirada em A, gera um sinal positivo e o ciclo de retirada em B com injeção em A um sinal negativo. Os períodos de "descanso" servem para inferir a deriva do potencial e definição de linha de base para o estado ativo de bombeamento.

que seriam movidos ao longo de um perfil. A análise dos perfis seria feita admitindo que uma correlação entre os dois potenciais indicaria que a posição da fonte de corrente injetada no solo estaria longe da descontinuidade. À medida que as anomalias fossem tornando-se não correlacionáveis, indicaria que o ponto de teste estaria na proximidade de uma descontinuidade.

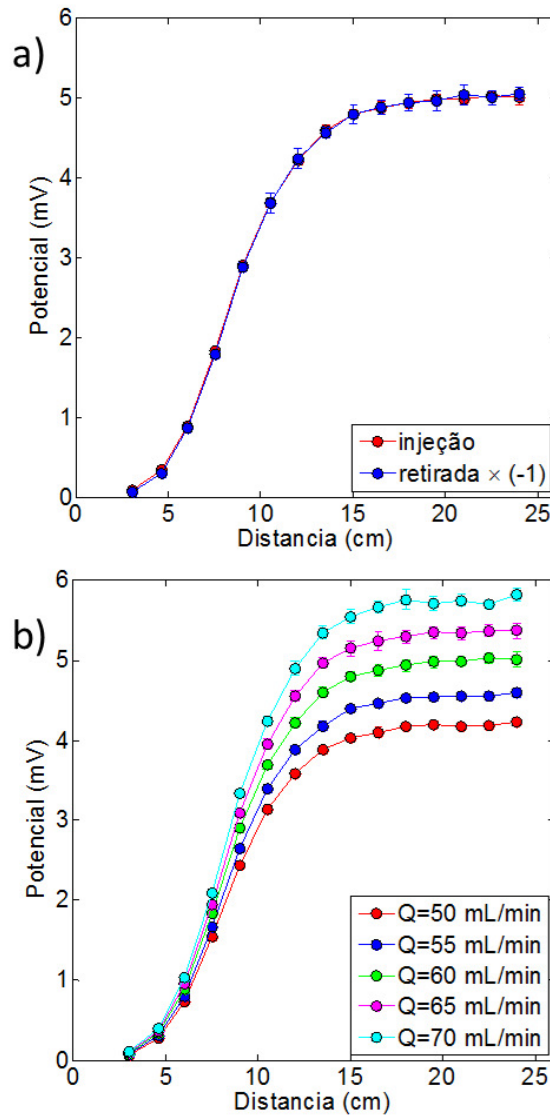


Figura 2.12: Potencial eletrocinético em teses de bombeamento: a) ciclos de injeção em B e retirada em A (linha vermelha) e de retirada em B e injeção em A (linha azul); b) perfis para injeção em B e retirada em A para as vazões de 50, 55, 60, 65 e 70 mLmin⁻¹.

2.5 Discussão dos resultados

A realização desta etapa experimental confirmou aspectos gerais verificados no trabalho precursor desta pesquisa (Silva, 2011). Confirma-se a linearidade entre os potenciais elétricos e eletrocinéticos, mostrando a consistência das bases de dados. Em termos qualitativos, os resultados obtidos na modelagem em tanque mostram que uma das premissas básicas do imageamento é verificada, a saber: que em um meio homogêneo existe a equivalência entre potenciais elétricos e eletrocinéticos resultantes, respectivamente de fontes pontuais de corrente e de injeção/retirada de água. Esta equivalência, a menos de um fator de escala que é função das propriedades físicas do meio poroso em particular, é observada nos testes

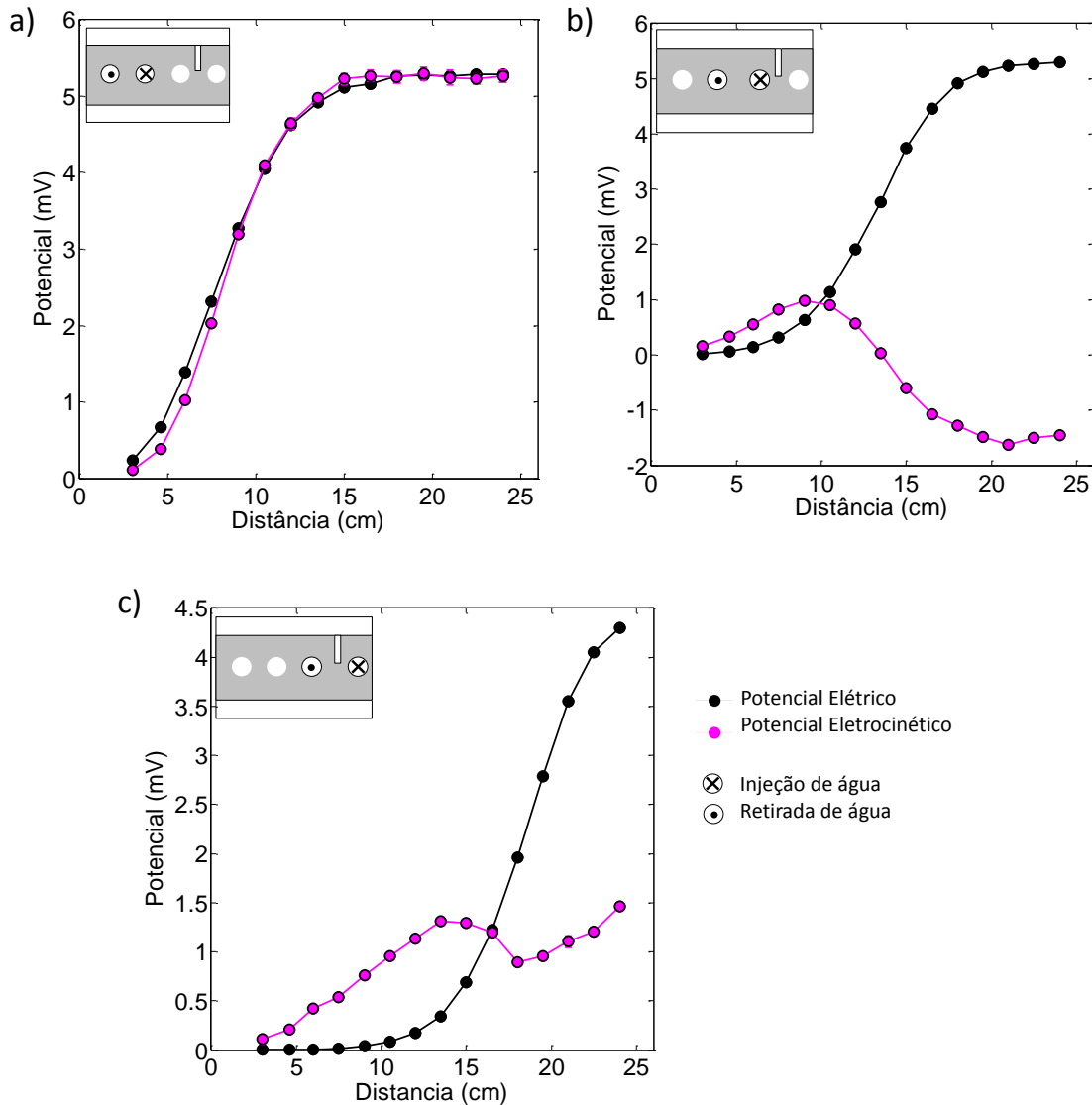


Figura 2.13: Perfis de potencial elétrico e electrocinético medidos em laboratório: a) perfil de potencial elétrico com pontos de corrente em A e B (preto), multiplicado por 7.9347×10^{-4} e potencial electrocinético (rosa), resultante de injeção de água em B e retirada em A; b) potencial elétrico (corrente em C e B), multiplicado por 2.7540×10^{-4} e potencial electrocinético (injeção em C e retirada em B); c) potencial elétrico (corrente em D e C preto), multiplicado por 3.0249×10^{-4} e potencial electrocinético (injeção em D e retirada em C).

de bombeamento nos pontos A e B, mais distantes da heterogeneidade representada pela fratura. De forma qualitativa, este resultado mostra que é possível identificar se um meio é homogêneo aplicando medições tais como descritas neste teste. Embora desenvolvidas para testes em tanque, procedimentos semelhantes podem ser utilizados em campo para caracterização de aquíferos ou reservatórios de petróleo. Outra característica inferida para testes

de bombeamento monitorados por potenciais elétricos diz respeito às respostas esperadas a partir de uma descontinuidade. Nestes casos, além das fontes de corrente diretamente associadas aos pontos de injeção/retirada, surgem fontes de corrente nas descontinuidades do meio. Os resultados obtidos com os testes em B e C, e depois em C e D, mostram como são expressivas as distorções no potencial eletrocinético causadas pelas descontinuidades no meio. Estas distorções são crescentes à medida que o fluxo de água no meio poroso atravessa a descontinuidade.

Os Capítulos 3 e 4, a seguir, tem como objetivo aplicar modelagem direta e inversa para entender a origem dos sinais gerados por descontinuidades do meio, mais especificamente para os resultados obtidos nos testes de bombeamento em BC e CD. O Capítulo 3 desenvolve resultado de modelagem numérica representando os fenômenos elétricos e hidráulicos envolvidos nos experimentos. O Capítulo 4, por outro lado, desenvolve abordagem de computacional para utilizar os dados medidos com o objetivo de determinar as heterogeneidades do meio a partir da inversão do potencial elétrico medidos em testes de bombeamento.

CAPÍTULO 3

Testes de Bombeamento: Modelagem Numérica

A modelagem numérica de um fenômeno físico tem como objetivo compreender o sistema físico envolvido e fazer previsões a seu respeito. Um problema real geralmente é muito complexo, uma vez que depende de um grande número de equações e variáveis. A construção de um modelo leva em consideração informações conhecidas sobre o problema, tais como as equações que regem os fenômenos e os parâmetros físicos que descrevem o modelo, a fim de simular o dado observado. Neste Capítulo temos como objetivo simular os dados elétricos e eletrocinéticos apresentados no Capítulo 2. Na simulação elétrica realizamos a modelagem de potencial elétrico resultante de uma fonte dipolar aplicada ao tanque. Na simulação eletrocinética, realizamos a modelagem do fluxo hidráulico e do potencial eletrocinético que surgem no bombeamento de água no meio poroso. A compreensão destes fenômenos torna-se, assim, uma ferramenta para a interpretação dos dados medidos em laboratório, com a possibilidade de ser estendida a estudos de campo. Este Capítulo apresenta a formulação utilizada na modelagem e os procedimentos numéricos aplicados, utilizando o programa COMSOL Multiphysics (Multiphysics, 2012).

3.1 Aspectos Teóricos

As equações para o cálculo dos potenciais elétrico e eletrocinético relacionam os potenciais com seus respectivos fluxos. No caso elétrico o campo é resultante de um fluxo de corrente aplicado ao meio e no caso eletrocinético, resultante do movimento da água no meio poroso, em resposta a um gradiente de pressão. Os potenciais podem ser calculados a partir das fontes de corrente e condições de fronteira estabelecidas para o problema.

3.1.1 O Problema Elétrico

A modelagem de fenômenos elétricos DC (corrente contínua) assume que o meio condutor seja do tipo ôhmico, no sentido de manter linearidade entre um campo elétrico estabelecido no meio e o fluxo de corrente resultante. Para o cálculo do fluxo de corrente em um meio

com pontos de injeção de corrente é válida a equação

$$\nabla \cdot J = Q_j, \quad (3.1)$$

sendo J (Am^{-2}) a densidade de corrente e Q_j a fonte (ou densidade volumétrica) de corrente (Am^{-3}). O termo Q_j é nulo em todos os pontos do meio, exceto naqueles com injeção de corrente. Na modelagem numérica pode-se fazer $Q_j = 1$ no polo positivo de corrente e -1 no polo negativo, simulando um fluxo de corrente correspondente a uma fonte bipolar unitária. A modelagem com estes valores é útil porque, pela linearidade da Lei de Ohm, um potencial causado por uma fonte diferente da unitária pode ser obtido multiplicando o potencial correspondente a fonte unitária pelo valor da corrente verdadeira. Este recurso facilita a análise dos dados reais, normalmente obtidos com correntes não-unitárias.

Pela Lei de Ohm, a densidade de corrente J relaciona-se linearmente com o campo elétrico E (Vm^{-1}) segundo

$$J = \sigma E \quad (3.2)$$

na qual a variável σ é a condutividade elétrica do meio (Sm^{-1}).

Do Teorema de Stokes decorre que o campo elétrico, E , é conservativo, sendo esta a condição necessária e suficiente para a existência de um potencial escalar V (V), tal que

$$E = -\nabla V. \quad (3.3)$$

As condições de contorno para o caso estacionário são a conservação da corrente $\nabla \cdot J = 0$, no interior do meio em pontos fora das fontes e condição de isolamento elétrico, $\hat{n} \cdot J = 0$, nas faces em que não há fluxo de corrente. O termo \hat{n} expressa o vetor unitário normal à superfície que confina o meio (tanque) ou contato entre as unidades geoeletricas.

3.1.2 O Problema Hidráulico

O problema hidráulico consiste no cálculo do fluxo de água em resposta a um gradiente de pressão. As equações para o cálculo do fluxo de água envolvem a descrição do meio no qual o fluxo é calculado. Para um fluxo livre, ou seja, em uma região na qual a água não está confinada nos poros de um material hospedeiro, o fluxo é regido pela equação de Navier-Stokes. Quando a água se infiltra por um meio poroso, o cálculo do fluxo é regido pela Lei de Darcy. As equação de Navier-Stokes, válida para o estudo do fluxo livre nas câmaras é dada por

$$\rho(v \cdot \nabla)v = \nabla \cdot [-pI + \mu(\nabla v + (\nabla v)^T)] + F \quad (3.4)$$

sob condição de incompressibilidade (aplicável para o fluxo de água) dada por

$$\nabla \cdot v = 0, \quad (3.5)$$

sendo μ a viscosidade dinâmica (Pas) da água, v a velocidade de fluxo na câmara (ms^{-1}), ρ a densidade do fluido (kgm^{-3}) e p a pressão (Pa).

A Lei de Darcy é válida para o fluxo no meio poroso. Quando parte do fluxo está no meio poroso e parte em um meio livre (câmara preenchida com água, por exemplo), uma forma estendida da Lei de Darcy, a equação de Brinkman, deve ser adotada. A equação de Brinkman leva em conta a transição do regime de fluxo na interface entre os meios. Essa equação (Discacciati e Quarteroni, 2009; Ehrhardt, 2012) para o cálculo do fluxo de água em um meio poroso com câmaras com fluxo livre é dada por

$$\frac{\rho}{\phi} \left((v \cdot \nabla) \frac{v}{\phi} \right) = \nabla \cdot \left[-pI + \frac{\mu}{\phi} \left(\nabla v + (\nabla v)^T \right) - \frac{2\mu}{3\phi} (\nabla \cdot v) I \right] - \left(\frac{\mu}{k_{br}} + \beta_f |v| + Q_{br} \right) v + F, \quad (3.6)$$

com a condição de continuidade

$$\rho \nabla \cdot v = Q_{br}, \quad (3.7)$$

sendo, ρ a densidade do fluido (kgm^{-3}), ϕ a porosidade (adimensional), v a velocidade do fluxo (ms^{-1}), p a pressão (Pa), μ a viscosidade dinâmica (Pas), k a permeabilidade do meio poroso (m^2), F um termo de força (Nm^{-3}) e Q_{br} ($\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$) uma variável que indica fluxo de massa (de água). O coeficiente β_f , denominado coeficiente de Forchheimer, é dado por

$$\beta_f = \frac{\rho \phi C_f}{\sqrt{k}} \quad (3.8)$$

com $C_f = 1,75/\sqrt{150\phi^3}$.

As equações 3.4 e 3.6 possuem termos correlacionáveis. O termo do lado esquerdo na equação de Navier-Stokes corresponde ao momento resultante do fluxo livre. A equação de Brinkman substitui este termo por uma contribuição associada com a força de arraste experimentada pelo fluido através do meio poroso. O termo β_f na equação 3.6 relaciona a turbulência com o arraste do fluxo.

Na interface das zonas com fluxo livre e no meio poroso as equações para os fluxos requerem continuidade na pressão e velocidade. Como a pressão é uma variável dependente nas equações 3.4 e 3.6, a pressão na interface é vinculada, fazendo $p = p_{br}$. O termo do lado esquerdo é a pressão na equação de Navier-Stokes e o termo do lado direito é a pressão na equação de Brinkman. Da mesma forma, a velocidade na interface é vinculada para garantir a continuidade, assumindo $v = v_{br}$. A condição de fronteira estabelece $\hat{n} \cdot v = 0$ nas paredes do tanque, pois não há transporte de massa através das paredes. Para simular testes de bombeamento, com injeção de água em um furo e extração na mesma razão em outro adjacente, as grandezas físicas relacionadas com a vazão e a pressão nos furos devem ser iguais em magnitude, porém com sinais opostos.

3.1.3 O Problema Eletrocinético

A densidade total de corrente, em um meio anisotrópico homogêneo, tal como discutido por Ahmed, Jardani, Revil e Dupont (2013) é dada pela equação

$$J = -\sigma \nabla \Phi + J_s \quad (3.9)$$

sendo σ a condutividade elétrica (Sm^{-1}) e Φ o potencial elétrico (V). A densidade de corrente, J_s , que macroscopicamente descreve as fontes do potencial eletrocinético (Am^{-2}), é obtida (Jardani, Revil, Bolève, Crespy, Dupont, Barrash e Malama, 2007)

$$J_s = Q_v v, \quad (3.10)$$

sendo Q_v (Cm^{-3}) a densidade volumétrica de carga, calculada segundo a equação 1.11 e v a velocidade do fluxo (ms^{-1}).

A equação da continuidade para a carga elétrica, $\nabla \cdot J = 0$, é aplicada à equação 3.9 e fornece

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \Phi) = \nabla \cdot J_s. \quad (3.11)$$

O potencial eletrocinético, Φ , pode ser calculado conhecendo-se a densidade de corrente J_s , e a condutividade elétrica do meio.

3.2 Modelagem Numérica

Para simular os campos observados nos experimento em tanque usamos o programa COMSOL Multiphysics (Multiphysics, 2012), que resolve pelo *método dos elementos finitos* um conjunto de equações que simulam fenômenos físicos que atuam simultaneamente em um mesmo sistema. A modelagem do tanque foi dividida em duas partes: a primeira envolvendo a solução do problema elétrico, a segunda resolvendo o problema eletrocinético. O problema elétrico teve como objetivo calcular o fluxo de carga (equação 3.1) resultante da injeção de corrente no meio e do potencial elétrico associado (equações 3.2 e 3.3). O problema eletrocinético envolveu o cálculo do fluxo hidráulico (equações 3.4 e 3.6), avaliação dos termos de corrente (equação 3.10) e, por fim, o cálculo do potencial eletrocinético (equação 3.11). Embora problemas físicos distintos sejam resolvidos, a geometria, domínio dos materiais (água e meio poroso) e a malha de discretização são comuns em todos os casos

3.2.1 Construção do modelo

Para desenhar o tanque, o primeiro passo é definir um plano cartesiano, que determinará onde a face ‘principal’ do tanque estará localizada e como ela será visualizada dentro de

um espaço tridimensional na área de trabalho. Definido o plano $x - z$, sendo x o eixo das abscissas e z , o eixo das ordenadas, a etapa seguinte é desenhar a face de interesse, no caso, a face da peça porosa que mostra a fratura mais a direita do tanque (Figura 3.1).

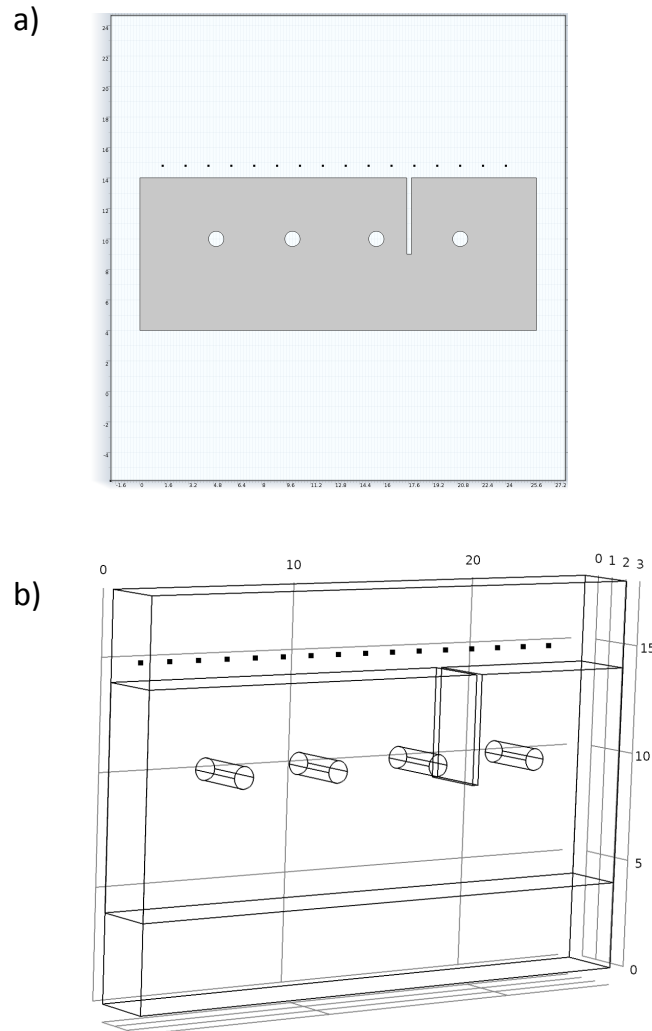


Figura 3.1: Construção geométrica do modelo: a) seção do modelo com peça porosa (cinza) e eletrodos (pontos pretos); b) modelo 3D obtidos a partir da 'extrusão' do modelo 2D. Dimensões em centímetros.

A peça foi desenhada pela composição de figuras geométricas regulares (Figura 3.1a) no plano (x, z) , a saber: um retângulo maior (26×10 cm), um retângulo menor de $5 \times 0,3$ cm (dimensões da fratura) e quatro círculos colineares, dispostos horizontalmente, de 1cm de diâmetro, representando os furos. A remoção da área correspondente à fratura e aos furos foi feita com o recurso de *operações booleanas*, no caso a operação de subtração. A largura do tanque foi definida pela função estiramento (*Extrude*) do COMSOL, tornando-a igual a 3cm na direção do eixo y . A finalização da geometria foi feita ao inserir um paralelepípedo

de $26 \times 18 \times 3\text{cm}$, correspondente às dimensões internas do tanque.

O passo seguinte da modelagem numérica consiste em identificar os domínios (Figura 3.2) dos materiais constituintes no modelo geométrico. O COMSOL dispõe de uma biblioteca de materiais pré-definidos, que podem ser modificados para que valores específicos de propriedades físicas sejam aplicadas. No caso elétrico, as grandezas requeridas são condutividade elétrica para cada um dos domínios (água e meio poroso) e a intensidade de corrente injetada no meio. No caso hidráulico as grandezas requeridas são viscosidade dinâmica e densidade da água, porosidade e permeabilidade do meio poroso e vazão aplicada no bombeamento.

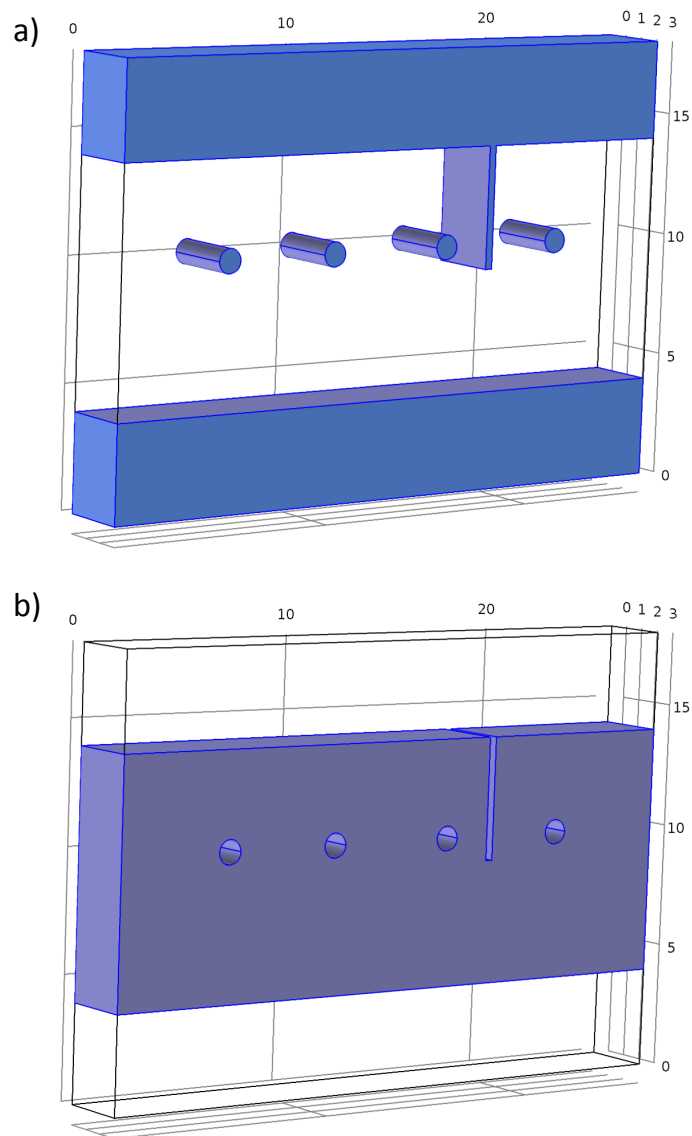


Figura 3.2: Seleção de domínios no modelo, para a definição de propriedades físicas dos meios. a) domínio da água e b) domínio da peça porosa.

3.2.2 Formulação por elementos finitos

Para resolver numericamente um problema pelo Método dos Elementos Finitos (FEM), o ponto de partida é a discretização do meio, operação que implica a construção de uma malha, que no caso 3D é composta por pequenos volumes justapostos, cada um com forma normalmente tetraédrica. Como mostra a Figura 3.3 os elementos da malha são distribuídos com tamanhos variáveis, dependendo da localização das interfaces, e dimensionados de acordo com a necessidade de detalhamento. Uma maior quantidade de elementos é concentrada nos limites das faces, entre a peça porosa e a água, o que destaca a fratura e os furos. O FEM pode ser implementado em malhas não estruturadas, que empregam espaçamentos e geometria bastante irregular.

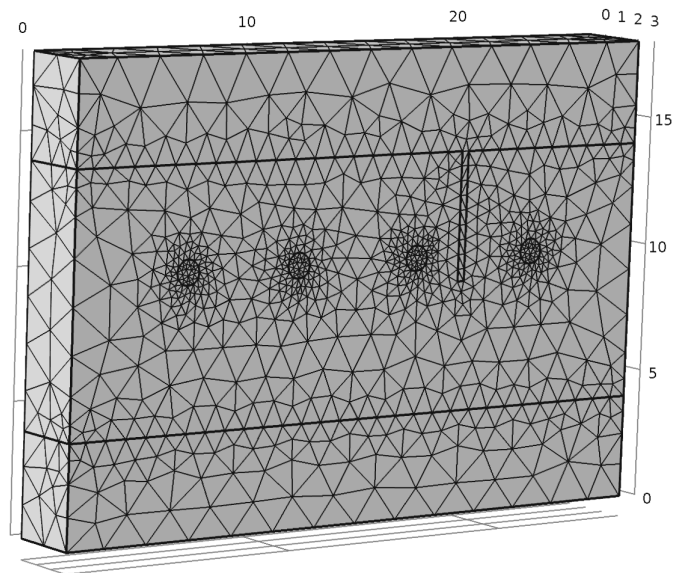


Figura 3.3: Malha de discretização para modelagem numérica de campos elétricos e hidráulicos usando métodos dos elementos finitos.

O FEM é um método numérico (Multiphysics, 2012) utilizado para resolver equações diferenciais parciais (EDP). A solução de uma EDP obtida com o FEM é expressa pela combinação linear de um conjunto finito de funções de base, com os coeficientes da combinação a serem determinados de acordo com as equações que regem o problema. A construção do problema no ambiente COMSOL é feita em quatro etapas: definição dos fenômenos físicos envolvidos (escolha das equações que regem os fenômenos), determinação das condições de contorno, atribuição dos valores das variáveis físicas do problema em particular e definição do método de solução para o sistema linear de equações gerado na formulação.

Usando formulação matricial, o sistema linear que resulta da formulação, assume a forma $Ax = b$, sendo A uma matriz (quadrada e esparsa) que incorpora de forma numérica os operadores diferenciais envolvidos no problema, x o vetor que contém as variáveis a serem determinadas e b a parte independente (ou de fonte) do problema. A solução do sistema linear por métodos diretos consiste em inverter a matriz A (ou decompô-la em bandas inferiores e superiores) para então obter a solução x . Utilizando métodos iterativos, a solução é obtida em passos sequenciais, até que a diferença entre dois passos sucessivos esteja dentro de um limite aceitável (condição de convergência). O método iterativo exige, assim, uma solução inicial.

3.2.3 Problema elétrico

Para o problema elétrico a definição das equações foi feita na opção *AC/DC Module: Electric Currents* do COMSOL, que implementa a Lei de Ohm, com a possibilidade de acrescentar fontes externas de corrente. As condições de fronteira foram impostas através da seleção das faces ou domínios nas quais as condições são válidas, tal como ilustra a Figura 3.4. A condição de conservação da corrente foi imposta nos domínios do tanque e a condição de isolamento elétrico às faces que o delimitam (3.4b). A atribuição de um potencial igual a zero na posição do eletrodo de referência permite simular a resposta de potencial caso diferenças de potencial fossem medidas. A fonte bipolar de corrente foi simulada atribuindo valores Q_j iguais a 1 e -1, para os polos positivo e negativo respectivamente, nos pontos correspondentes aos eletrodos de corrente. Na simulação numérica, assim como no experimento em tanque, os pares de injeção de corrente, foram: AB, BC e CD (segundo a nomenclatura dos furos da esquerda para a direita em A, B, C e D). Por exemplo, um par de injeção AB, significa que o polo positivo foi colocado em B e o negativo em A.

No módulo AC/DC do COMSOL, a variável dependente (ou seja: a ser determinada na modelagem) é o potencial elétrico. A condutividade elétrica da água foi de $6,84 \times 10^{-3}$ S m e a condutividade elétrica do meio poroso ($3,91 \times 10^{-4}$) S m, valores obtidos experimentalmente no Capítulo 2. A solução do sistema linear foi obtida aplicando o método do gradiente conjugado.

3.2.4 Problema eletrocinético

A modelagem do problema eletrocinético foi realizada resolvendo-se as equações do fluxo hidráulico e depois as equações do potencial eletrocinético. Para o fluxo hidráulico utilizamos o módulo *Subsurface Flow Module: Free and Porous Media Flow*. As condições de contorno consideram que não há fluxo de água atravessando as paredes do tanque, que há um furo com entrada de massa de água na taxa de 1×10^{-3} kgs⁻¹ e outro furo de extração da água onde a

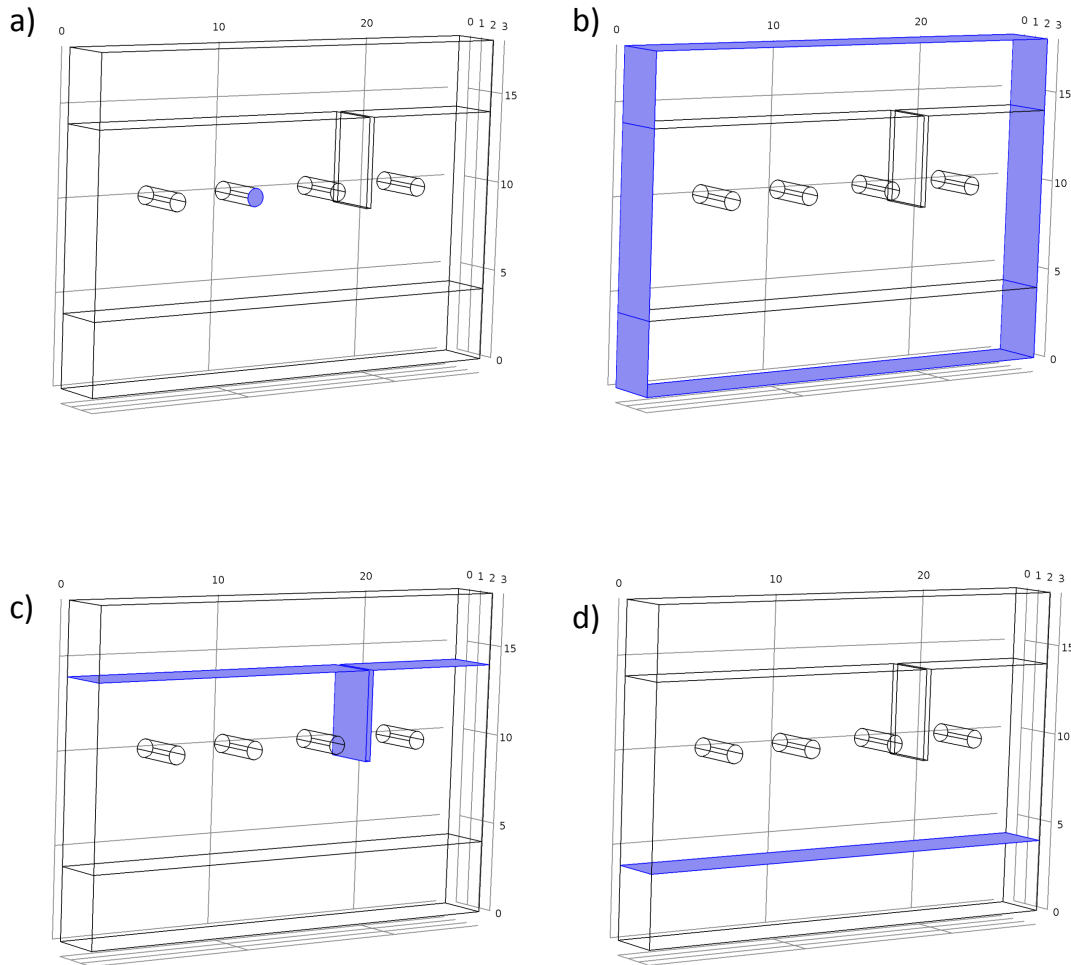


Figura 3.4: Seleção de domínios no modelo, para a definição de propriedades físicas e condições de fronteira. a) seleção de furo para especificação de fontes de corrente (caso elétrico) ou parâmetro de fluxo (caso hidráulico); b) seleção de faces do tanque implementando regime de fluxo nulo nos limites do tanque; c) seleção de interfaces para determinação do parâmetro de fluxo e cálculo das fontes de corrente do potencial electrocinético na face superior da peça porosa e d) seleção da face inferior da peça porosa.

pressão é de $-15,5589 \times 10^3$ Pa. A determinação dos meios onde são válidas as equações de Navier-Stokes e as equações de Brinkman foi feita selecionando os domínios correspondentes à água na câmara e ao meio poroso saturado.

Na segunda etapa da modelagem, os valores da velocidade do fluxo de água, u , provenientes do *Subsurface Flow Module*, foram lidos como variáveis de entrada no módulo AC/DC. Isso foi possível, organizando o estudo em dois passos. Um estudo determina como o modelo deve ser resolvido e guarda as variáveis e o modelo geométrico. O passo 1 calcula, então,

o fluxo de água, passando as grandezas necessárias para o passo 2, que calcula o campo eletrocinético. Além da velocidade do fluxo, outras variáveis de entrada para o cálculo do potencial foram a condutividade elétrica da água, $6,84 \times 10^{-3} \text{ S m}$, e a condutividade elétrica do meio poroso, $3,91 \times 10^{-4} \text{ Sm}^{-1}$. A obtenção dos valores de condutividade da água e do meio poroso está descrita no Capítulo 2.

O sinal de potencial eletrocinético está relacionado a um gradiente de propriedade física que, no caso do tanque, coincide com as interfaces da peça porosa.

As fontes de corrente nestas interfaces, foram calculadas fazendo

$$J_0 = -Q_v(\hat{n} \cdot u), \quad (3.12)$$

sendo J_0 (Am^{-2}) a densidade de corrente nas interfaces da peça porosa, excluindo, as interfaces laterais, que coincidem com as paredes do tanque. O vetor unitário \hat{n} é normal à superfície das interfaces e Q_v (Am^{-3}) a densidade volumétrica de carga. A obtenção dos valores de Q_v é descrita na seção de resultados para cada combinação de furos de injeção/retirada de água. O fluxo de corrente foi calculado pelo *Método Direto* do COMSOL, que consiste em resolver o sistema linear de equações usando a decomposição LU da matriz.

3.3 Resultados da modelagem dos fluxos elétrico e hidráulico

A modelagem numérica fornece os potenciais elétrico e hidráulico e os respectivos fluxos de corrente e massa. Nossa análise parte da comparação de como estes campos sofrem distorções distintas quando os testes de bombeamento são feitos em posições homogêneas e heterogêneas do meio, começando pelo lado mais homogêneo e se aproximando da descontinuidade que simula uma fratura. Como apresentado no Capítulo 2, um conjunto de quatro furos foi utilizado para testes, com agrupamento em pares A-B, B-C e C-D. Os testes no par A-B cobrem a parte mais homogênea do meio, o par B-C é afetado lateralmente pela fratura e o par C-D engloba, integralmente, a fratura. Para facilitar a análise em cada caso apresentamos os resultados de cada par de furos, por meio de figuras compostas com a distribuição das linhas de fluxo elétrico e hidráulico e seus respectivos potenciais. Para padronizar a apresentação dos resultados, a descrição do Caso A-B, por exemplo, considera que no teste elétrico o polo positivo de corrente foi colocado em B (lado direito da figura correspondente) e o negativo em A. No teste hidráulico a convenção é de injeção em B e retirada em A.

De um modo geral, para os três casos considerados, os resultados para o fluxo elétrico mostram campos com formato bipolar, com as linhas de fluxo se distribuindo regularmente entre os pólos de corrente. Embora havendo distorções nas heterogeneidades do meio, na fratura e furos adjacentes, o caráter bipolar dos campos basicamente permanece inalterado. Para o fluxo hidráulico, entretanto, as linhas de fluxo se distorcem deste formato bipolar

com um menor número de linhas imediatamente nas posições intermediárias entre os furos. O fluxo hidráulico concentra-se assim pela laterais do tanque.

3.3.1 Caso A-B

A Figura 3.5 mostra as linhas de fluxo para os testes de injeção de corrente e de água, bem como os potenciais (elétrico e de pressão) correspondentes. Uma análise qualitativa dos resultados mostra o efeito das descontinuidades (furos e fratura) em cada um dos fluxos e o padrão distinto das distorções na vizinhança da fratura. No lado direito do tanque, o fluxo hidráulico (Figura 3.5b) mantém um padrão de circulação isolado, no qual as linhas de fluxo não se fecham nos pontos de injeção ou retirada. A maioria das linhas de fluxo, entretanto, apresenta um padrão bipolar, muito semelhante ao padrão apresentado pelo fluxo de corrente (Figura 3.5a). Se comparado com os demais casos, veremos que o caso A-B é o único que apresenta uma semelhança marcante nos dois regimes de fluxo, com um número menor de linhas distorcidas pela fratura.

3.3.2 Caso B-C

Os resultados da modelagem para o Caso B-C, mostrados na Figura 3.6 mostram regimes de fluxo substancialmente diferentes para os testes elétrico e hidráulico. Os campos elétricos (corrente e potencial) mantêm seu caráter bipolar, característica que fica bem distorcida para os campos hidráulicos. Ocorre no caso hidráulico (Figura 3.6b) um gradiente de pressão entre as câmaras superior e inferior do tanque, pois o ponto de injeção (C), por estar mais próximo da fratura faz com que um excesso de pressão seja aplicado diretamente na câmara superior. Entretanto, como o fluxo ocorre em circuito fechado, o lado direito do tanque mantém um sistema de circulação confinado no qual as linhas de fluxo não se fecham nos pontos de injeção ou retirada. Esta é uma feição não observada no fluxo elétrico, que impõe uma circulação apenas de caráter bipolar que se estende por todo o tanque. Outro ponto a se destacar é a orientação das linhas de fluxo que atravessam a fratura: oblíqua no caso elétrico e normal no caso hidráulico. Este aspecto será retomado na interpretação do potencial eletrocinético pois a geração do campo secundário, devido às heterogeneidades do meio, depende da orientação do fluxo em relação à direção com maior contraste de propriedade física.

3.3.3 Caso C-D

Os resultados para o caso C-D na Figura 3.7 mostram que o fluxo hidráulico se afasta ainda mais do padrão bipolar, com predominância das linhas de fluxo fora da área intermediária entre os furos C e D. Nota-se também o comportamento diferente dos fluxos de corrente (Figura 3.7a) e de água (Figura 3.7b) em resposta à heterogeneidade estabelecida pela fratura.

O fluxo de água atravessa a fratura perpendicularmente, ao contrário do fluxo de corrente. Neste caso, o fluxo hidráulico não apresenta padrões isolados de circulação e não se observa gradiente de pressão entre as câmaras superior e inferior. Os dois regimes de fluxo se diferenciam, então, pela preferência do fluxo hidráulico se afastar da posição intermediária entre os furos. Nas interfaces do meio poroso, topo e base, o fluxo hidráulico também é normal, indicando que a câmara com água define uma equipotencial, o mesmo não acontece com o campo elétrico.

3.4 Resultados da modelagem do potencial eletrocinético

Para modelar o perfil eletrocinético usando a Lei de Ohm é necessário o conhecimento da densidade de corrente e da condutividade elétrica do meio. A condutividade dos meios provém das medidas realizadas em laboratório (ver Capítulo 2), já a densidade de corrente nas interfaces precisa ser calculada por modelagem numérica. A equação 3.12 mostra que a densidade de corrente depende da densidade volumétrica de carga Q_v (Cm^{-3}) e da velocidade do fluxo v (ms^{-1}), obtido na solução do problema hidráulico.

O valor de Q_v para um meio poroso com permeabilidade de 85,6 mD, calculado pela equação 1.11 (equação empírica aceita para o cálculo aproximado de Q_v), fornece $32,77 \text{ Cm}^{-3}$. Entretanto, quando usado na modelagem, este valor não reproduz a amplitude das anomalias medidas em laboratório. Para determinar um valor mais representativo, escolhemos o termo Q_v baseado no ajuste da amplitude do potencial eletrocinético.

3.4.1 Cálculo de Q_v

O perfil eletrocinético para cada par de injeção e retirada foi obtido somando-se perfis de potencial eletrocinético produzidos por corrente nas interfaces superior e inferior e nos furos da peça porosa. A densidade volumétrica de carga Q_v para cada estrutura foi obtida pelo método dos mínimos quadrados. O ajuste dos dados foi sujeito à um vínculo que impõe a igualdade de Q_v para um furo usado em mais de uma combinação de injeção e retirada. Por exemplo, o furo B, usado na combinação AB e BC de injeção e retirada. Como resultado, o valor de Q_v para o furo B foi 746 Cm^{-3} , para o furo C, foi 725 Cm^{-3} e para os furos A e D foram respectivamente, 750 e 725 Cm^{-3} . Para as interfaces superior e inferior os valores de Q_v médio obtidos foram 760 e 980 Cm^{-3} .

A qualidade do ajuste das anomalias de potencial eletrocinético é avaliada no gráfico dos dados medidos em função dos dados calculados (Figura 3.8d), que mostra uma forte correlação linear de 0,9962 entre os dados.

3.4.2 Caso A-B

A Figura 3.8 resume os perfis resultantes da modelagem e os respectivos perfis experimentais. Na Figura 3.8a, observamos um ajuste satisfatório dos potenciais medido e calculado resultantes do ponto de injeção de água à direita, furo B, e retirada à esquerda, furo A (ver figura esquemática miniaturizada do tanque na figura). Analisando este resultado de acordo com o fluxo e os sinais das fontes de corrente esperados para este modelo (Figura 4.1a), podemos afirmar que o ajuste praticamente perfeito entre os dados medidos e calculados deve-se ao fato de os pontos de injeção e retirada estarem distantes da descontinuidade, sofrendo desta forma menor efeito da fratura. No caso A-B as linhas de fluxo nos casos elétrico e hidráulicos apresentam o mesmo padrão dipolar, fazendo com que haja uma correspondência quase perfeita nos dois regimes de fluxo.

3.4.3 Caso B-C

O ajuste entre os dados medidos e calculados (Figura 3.8b), foi quase tão bom quanto o descrito no caso A-B, respeitando a polaridade e a amplitude da anomalia medida.

3.4.4 Caso C-D

A Figura 3.8c mostra, tal como no caso B-C, o ajuste entre os perfis medido e calculado foi aproximado e apresentou uma boa correlação entre os dados. Observa-se uma correspondência na polaridade das curvas do perfil e forma geral dos perfis, especialmente longe da fratura.

3.5 Análise dos Resultados

A modelagem numérica dos campos elétrico e hidráulico mostra que as linhas de fluxo sofrem deformação marcante na proximidade da fratura e que há correspondência entre os campos elétrico e hidráulico apenas quando os fluxos ocupam um volume homogêneo do meio. Nesta condição observa-se uma correspondência praticamente perfeita entre o potencial elétrico (que se estabelece em resposta às fontes de corrente) e o potencial eletrocinético (que se estabelece em resposta aos testes de bombeamento). Fora das fontes de corrente (pontos de injeção e retirada) os resultados da modelagem numérica apresentados neste capítulo indicam que o fluxo hidráulico foge do padrão dipolar ao contrário do fluxo elétrico. O fluxo hidráulico forma subdomínios com circulação restrita, na qual as linhas de fluxo não se fecham nos pontos de bombeamento. Observa-se também a forte dependência do fluxo hidráulico com a proximidade dos pontos de injeção com a fratura.

A modelagem do potencial eletrocinético mostra que, em seus aspectos gerais (amplitude e polaridade das anomalias), o potencial eletrocinético pode ser representado por distribuições de corrente afetadas pela descontinuidade. O mapeamento destas fontes permitiria, então, a determinação das heterogeneidades na vizinhança dos poços. Este é o argumento fundamental na metodologia de "imageamento hidrogeológico" pleiteada por diversos autores e que encontra fundamentação nos ensaios realizados. Este resultado, que em parte corrobora os conceitos centrais que fundamentam o "imageamento hidrogeológico", será explorado no Capítulo 4, quando utilizaremos os potenciais eletrocinéticos medidos nos testes de bombeamento para localizar as heterogeneidades do meio.

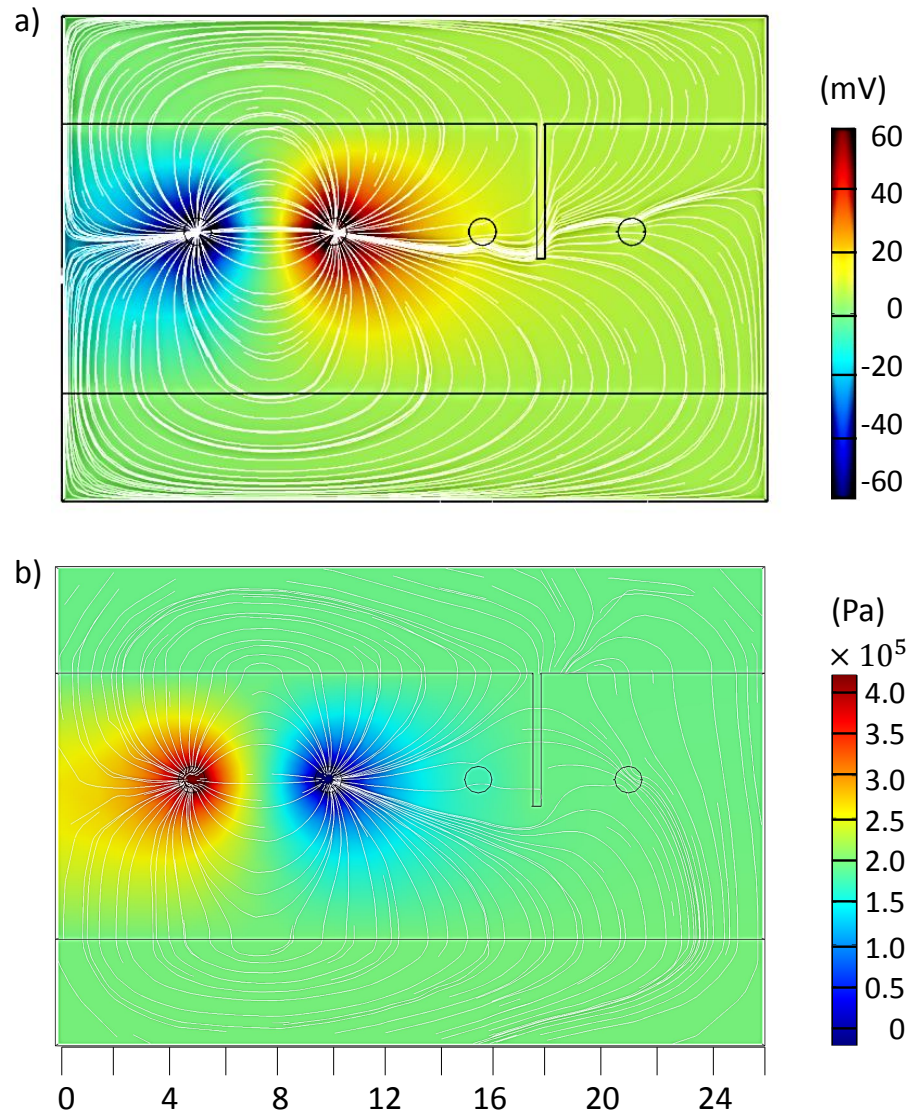


Figura 3.5: Resultados da modelagem para o Caso A-B: a) fluxo de corrente (linhas em branco) resultante de polos de corrente (negativo à esquerda, positivo à direita) e potencial elétrico associado (mapa em cores); b) fluxo de água e campo de pressão associado. Injeção à direita e retirada à esquerda com vazão de 60mLs^{-1} . Note as linhas de fluxo deformadas na presença dos furos.

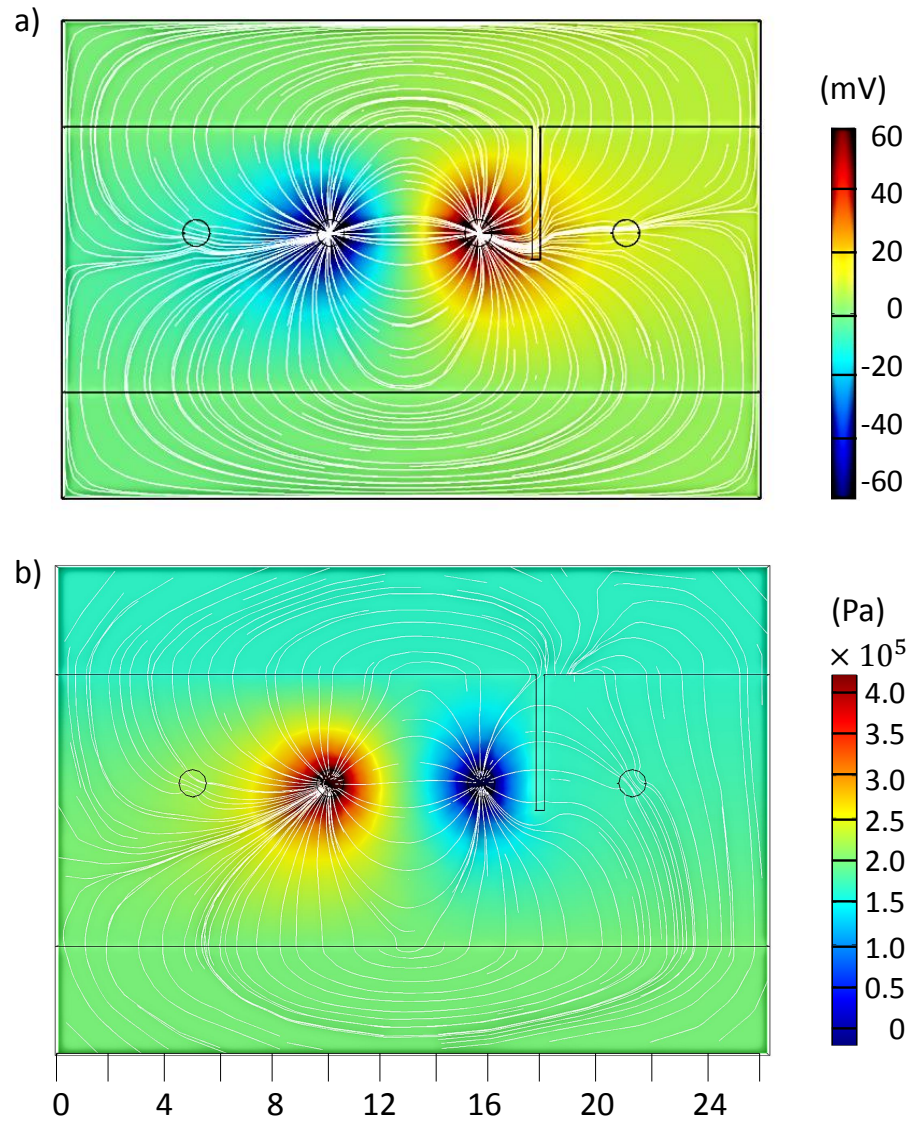


Figura 3.6: Resultados da modelagem para o Caso B-C: a) fluxo de corrente (linhas em branco) resultante de polos de corrente (negativo à esquerda, positivo à direita) e potencial elétrico associado (mapa em cores); b) fluxo de água e campo de pressão resultante de injeção no furo à direita e retirada à esquerda com vazão de 60mLs^{-1} . Note o gradiente de pressão que se estabelece entre as câmaras superior e inferior do tanque devido a proximidade do furo de injeção com a fratura.

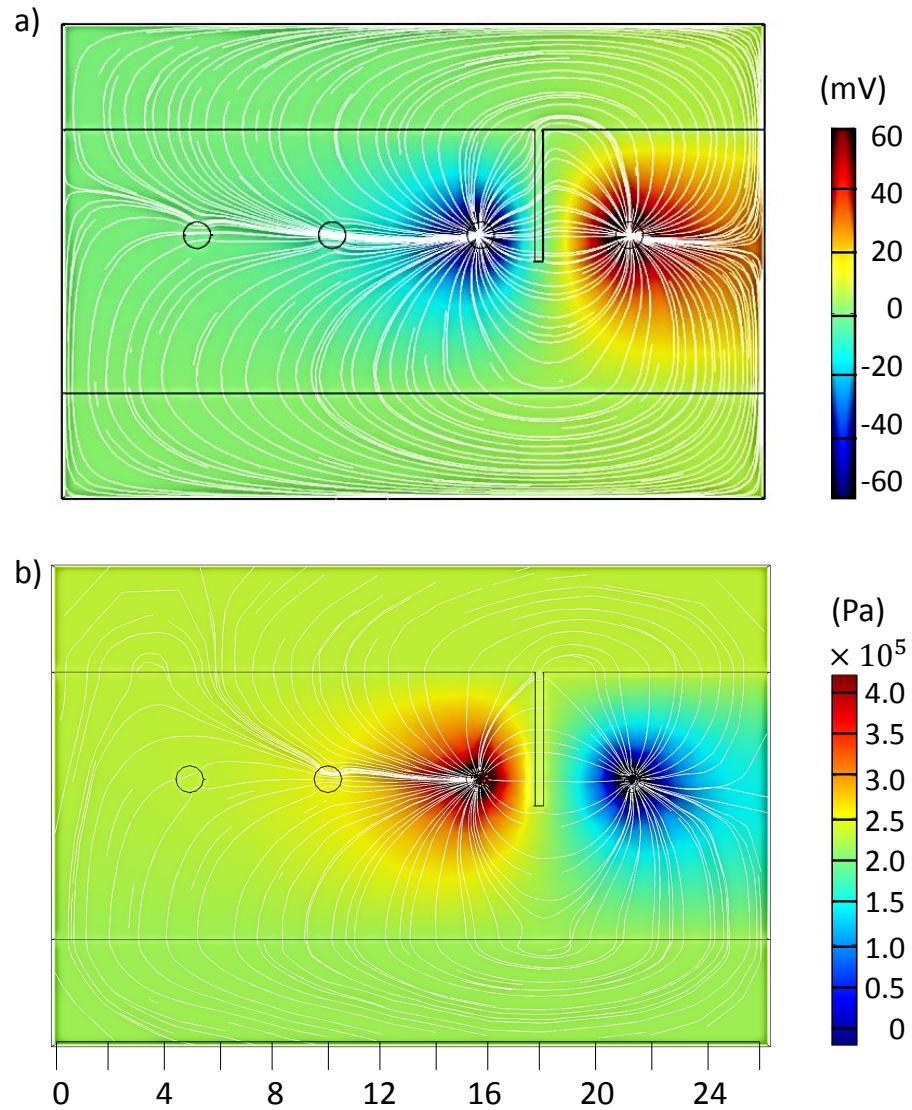


Figura 3.7: Resultados da modelagem, Caso C-D: a) fluxo de corrente (linhas em branco) resultante de polos de corrente (negativo à esquerda e positivo à direita) e potencial elétrico associado (mapa em cores); b) fluxo de água e campo de pressão associado. Injeção à direita e retirada à esquerda com vazão de 60mLs^{-1} . Linhas de fluxo atravessando a fratura obliquamente no caso elétrico e perpendicularmente no caso eletrocinético.

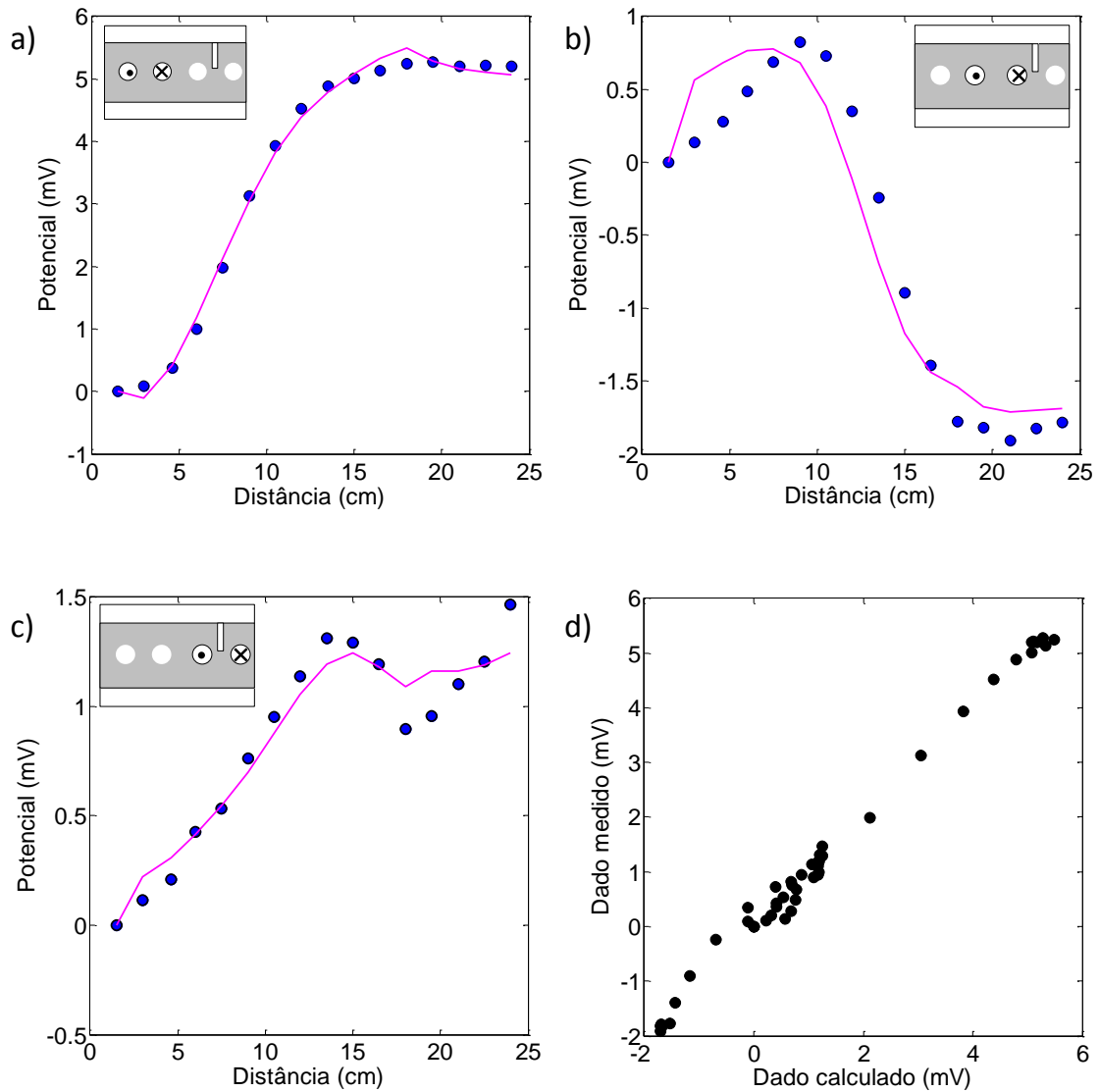


Figura 3.8: Resultado de potencial eletrocinético medido em laboratório (pontos cheios) e calculado pela modelagem (linhas contínuas). A figura esquemática do tanque que acompanha os gráficos mostra o ponto de injeção da água (marcado por um 'x') e os pontos de retirada (marcado por um 'o'). a) os perfis apresentam ajuste perfeito; b) a forma da anomalia calculada respeita a polaridade da curva do dado medido; c) a forma da curva da anomalia medida concorda com o dado de laboratório até a proximidade da posição da fratura; d) potencial eletrocinético medido em laboratório em função do potencial calculado através da modelagem física.

CAPÍTULO 4

Mapeamento de Fontes de Corrente

É crescente o interesse de pesquisadores na inversão de anomalias de Potencial Espontâneo (PE) em termos de suas fontes de corrente como forma de obter informações quantitativas e qualitativas acerca de processos dinâmicos que ocorrem no substrato. Em estudos de hidrogeofísica, a polaridade das fontes de corrente indica pontos onde o fluido entra ou sai do meio. Desta forma, o mapeamento de pontos de corrente (localização e polaridade) pode fornecer valiosas informações sobre o fluxo de água subterrânea. As distribuições de fontes de corrente são complexas, como ilustra a Figura 4.1 (direita). A Figura 4.1 (esquerda) esquematiza as direções das linhas de fluxo, fator importante para prever a polaridade das fontes de corrente nas interfaces, relacionando a polos positivos aqueles em que a água evade do meio em direção às câmaras e a polos negativos os pontos onde o fluxo penetra no meio .

Ao atravessar a fratura a distribuição de polaridade alterna polos positivos e negativos. A troca de polaridade, visualizada como uma intercalação na direção perpendicular às interfaces, das polaridades, enfatizam a dificuldade em mapear estas fontes. Para mapeá-las propomos a inversão do potencial espontâneo com diferentes vínculos. O objetivo dos vínculos é restringir o conjunto de soluções com a introdução de informação a priori, por meio de vínculos, de modo a tornar o problema inverso bem posto. Além disso, um vínculo impõe uma característica a solução, como suavidade, por exemplo. Desta forma, a escolha de um vínculo deve levar em conta o tipo de solução que se espera, tendo como base o contexto geofísico em questão.

Neste capítulo, o procedimento de inversão é aplicado à interpretação de dados experimentais obtidos em tanque (modelagem física). Para analisar os resultados, levamos em conta a estrutura e a composição do meio poroso utilizado na modelagem e os resultados de simulação numérica apresentados no Capítulo anterior.

4.1 Vínculos para o Mapeamento de Fontes

No mapeamento das fontes de corrente empregamos dois vínculos que atribuem características essencialmente diferentes à solução. O primeiro deles, o Vínculo Compacto, imprime uma distribuição volumétrica de fontes de corrente, assumindo que essas fontes podem

estar em todos os pontos da malha de resistividade. O segundo, Vínculo de Contraste, permite que os pontos de corrente estejam localizados somente na vizinhança de interfaces separando meios com resistividades distintas. A solução volumétrica é aplicável ao estudo de áreas contaminadas (Minsley, Sogade e Morgan, 2007b; Minsley, Sogade e Morgan, 2007a) porque admite-se que as reações redox estão associadas à biodegradação dentro do volume da pluma de contaminação. A solução de correntes em interfaces é aplicável ao estudo de corpos minerais condutivos (Mendonça, 2008a; Castermant, Mendonça, Revil, Trolard, Bourrié e Linde, 2008) porque neste cenário, pelos modelos de geobateria, a interface mineral é que experimenta as reações redox. Outra aplicação, alvo de interesse nesta pesquisa, é o estudo de fluxo de água subterrânea (Silva, 2011), pois neste cenário, tanto o contraste da permeabilidade, quanto atributos da dupla camada podem ser associados à origem do sinal de PE (Sill, 1983).

Na inversão PE com o Vínculo Compacto a solução abrange os pontos da malha correspondentes ao volume da peça porosa e esta condição funciona como uma informação a priori de que não há fontes de corrente na parte do tanque preenchida com água (câmaras superior e inferior do tanque). Na inversão com o vínculo de contraste o modelo de resistividade é utilizado para construir uma matriz de peso que favorece a colocação de termos não-nulos nas posições com gradiente não-nulo de resistividade. O vínculo de contraste não obriga o intérprete a selecionar um subdomínio da malha, tal como, por exemplo, é feita quando se exclui as câmaras inferior e superior do tanque. Os vínculos implementados são então aplicados na inversão dos perfis PE medidos no tanque experimental (ver Capítulo 2) individualmente ou associados à condição de eletroneutralidade, resultando em quatro grupos de solução decorrentes da introdução do Vínculo Compacto, Vínculo Compacto com Eletroneutralidade, Vínculo de Contraste e Vínculo de Contraste com Eletroneutralidade, para cada perfil PE.

4.2 Resultados da inversão

A inversão do potencial espontâneo forneceu distribuições de fontes de corrente para o tanque. A análise dos resultados é feita de forma conjunta, a fim de avaliar o desempenho dos vínculos. Para a apresentação dos resultados, adotamos o agrupamento dos mesmos de acordo com os pares de injeção e retirada em A-B, B-C e C-D, ver capítulo 2. Consideramos que um bom mapeamento de fontes seria alcançado por distribuições não volumétricas, localizadas nas interfaces e nos furos, onde estão sendo realizadas as operações de injeção e retirada, com a possível recuperação da polaridade referente a cada um destes. Os vínculos empregados nas soluções foram Vínculo do Inverso da Profundidade (VINP), Inversão Compacta (IC) e Vínculo de Contraste (VC). Como a inversão compacta exige uma solução inicial, para todos os experimentos aqui apresentados adotamos a solução do VINP como entrada no processo

iterativo da IC.

4.3 Caso A-B

No caso AB, na Figura 4.2a a solução com o vínculo do inverso da profundidade ($\mu_{vinp} = 1.09 \times 10^3$) apresenta uma distribuição volumétrica localizando as fontes de corrente nas interfaces superior e inferior, sendo que não há um bom indicativo da presença dos furos e nem da fratura. A solução com a inversão compacta 4.2b ($b = 0.001$) resulta em uma distribuição menos volumétrica, e próxima à interface superior, porém também não há um indício da existência dos furos. O mapeamento das fontes de corrente com o vínculo de contraste ($\mu_{vc} = 1.40 \times 10^7$), figura 4.2c, apresenta uma distribuição com fontes de corrente em interfaces e nos furos A, B e C, além de localizar a fratura, não conseguindo recuperar apenas a extensão da mesma. Analisando as polaridades de acordo com as figuras auxiliares de interpretação (Figuras 4.2d, e e f), notamos que as mesmas estão invertidas no mapeamento em superfície pela VS, IC e VC. Em relação aos furos, a polaridade da distribuição obtida com o VC condiz com o valor esperado. Atribuímos a troca de polaridade da face superior à dificuldade do vínculo em alternar distribuições com polaridades de sinal contrário na vertical.

4.4 Caso B-C

O resultado obtido com o vínculo do inverso da profundidade ($\mu_{vinp} = 1.09 \times 10^3$), Figura 4.3a, apresentou uma solução volumétrica estendendo-se da face superior até a altura dos furos, as polaridades desta solução estão condizentes com aquelas esperadas para a interface superior (Figura 4.3f). A inversão compacta ($b = 0.0015$), Figura 4.3b, apresentou solução menos volumétrica, localizada na interface superior e com a polaridade também condizente com a interface superior. Para a solução com o vínculo de contraste ($\mu_{vc} = 6.74 \times 10^6$) (Figura 4.3c), a distribuição localizou bem as interfaces superior, inferior, o furo B e a fratura, dando um bom indicativo também dos furos A e D. A polaridade da interface superior no caso VC, assim como em VS e IC, foi compatível a esperada. No caso da fratura o único vínculo que mostra-se eficaz para localizar a posição da mesma é o vínculo de contraste, sem no entanto conseguir recuperar a extensão e a mudança de polaridade que resulta da saída do fluxo de água em um lado da fratura e entrada no lado oposto.

4.5 Caso C-D

No caso C-D, a solução da VINP ($\mu_{vinp} = 1.1 \times 10^3$), Figura 4.4a, e IC ($b = 0.004$), Figura 4.4b, tem distribuição similar ao caso B-C, com as polaridades iguais àquelas esperadas na superfície, não localizando, no entanto, os poços e nem a fratura. A solução com vínculo de contraste ($\mu_{vc} = 3.33 \times 10^4$), Figura 4.4c, localizou bem as interfaces, deu um bom indicativos dos furos e a polaridade da distribuição foi alcançada somente para interface superior.

4.6 Resultados: vínculo de interface e eletroneutralidade

Nas inversões apresentadas, o VC foi o que apresentou melhor desempenho, sendo por isso escolhido para a obtenção de uma solução que combine a reconstituição da posição das fontes de corrente com o atributo físico de eletroneutralidade. Assim, apresentamos o resultado combinado de VC e eletroneutralidade para os casos A-B, B-C e C-D, comparando-os com aqueles já obtidos somente com o VC (figuras 4.2c, 4.3c e 4.4c).

4.7 Caso A-B

A soma de todos os pontos de corrente da distribuição obtida com o VC Figura 4.5a mostra que esse valor não é nulo. Invertendo o potencial para o mesmo conjunto de parâmetros impondo à solução a eletroneutralidade Figura 4.5b, observamos que a solução não se altera significativamente no que se refere às características de volume e posição, mas a soma das cargas passa a ser nula, atribuindo assim significado físico à solução.

4.8 Caso B-C e C-D

Para os casos B-C, Figura 4.6b e C-D, 4.7b a imposição de eletroneutralidade à solução do VC também não provocou alterações no volume e posição das distribuições, mas agregou à solução o atributo de soma de cargas nulas.

4.9 Análise dos resultados

Como resultado dos testes de inversão nos dados de potencial espontâneo provenientes das medidas em tanque, confirmamos o Vínculo de contraste (VC) como mais eficaz na identificação de descontinuidade no meio. Diante dos resultados constatamos a dificuldade da

reconstituição da polaridade das fontes de corrente. Apesar disto, acreditamos na aplicabilidade do vínculo de contraste para a interpretação geológica de meios com contrastes de propriedades físicas.

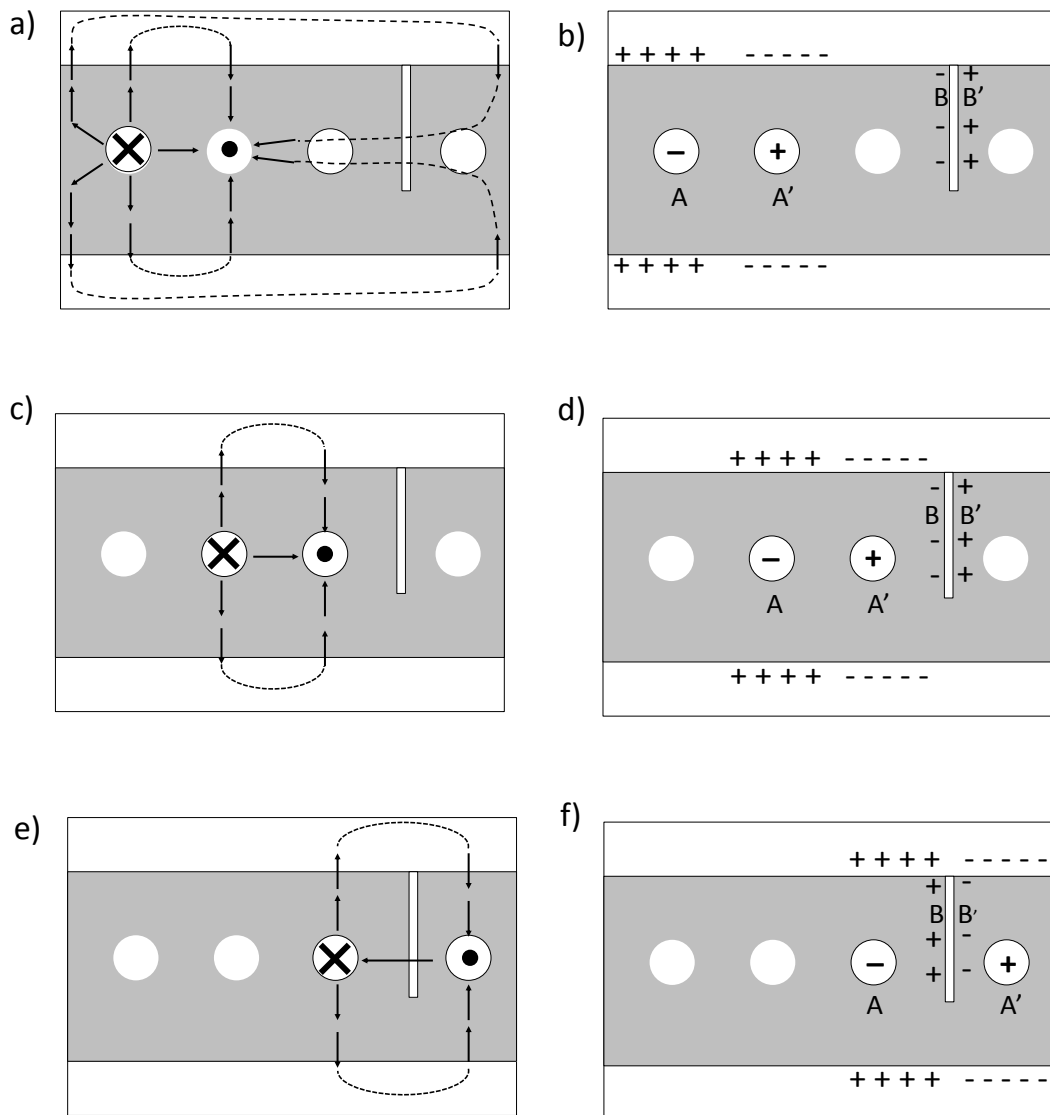


Figura 4.1: Figura esquemática do fluxo de água gerado em testes de bombeamento (esquerda) e distribuição de corrente correspondente (direita). Esquema para bombeamento longe (a e b), ao lado (c e d) e envolvendo (e e f) a descontinuidade. Linhas do fluxo de água (tracejado) e polos positivos (+) e negativos (-) de corrente na interface.

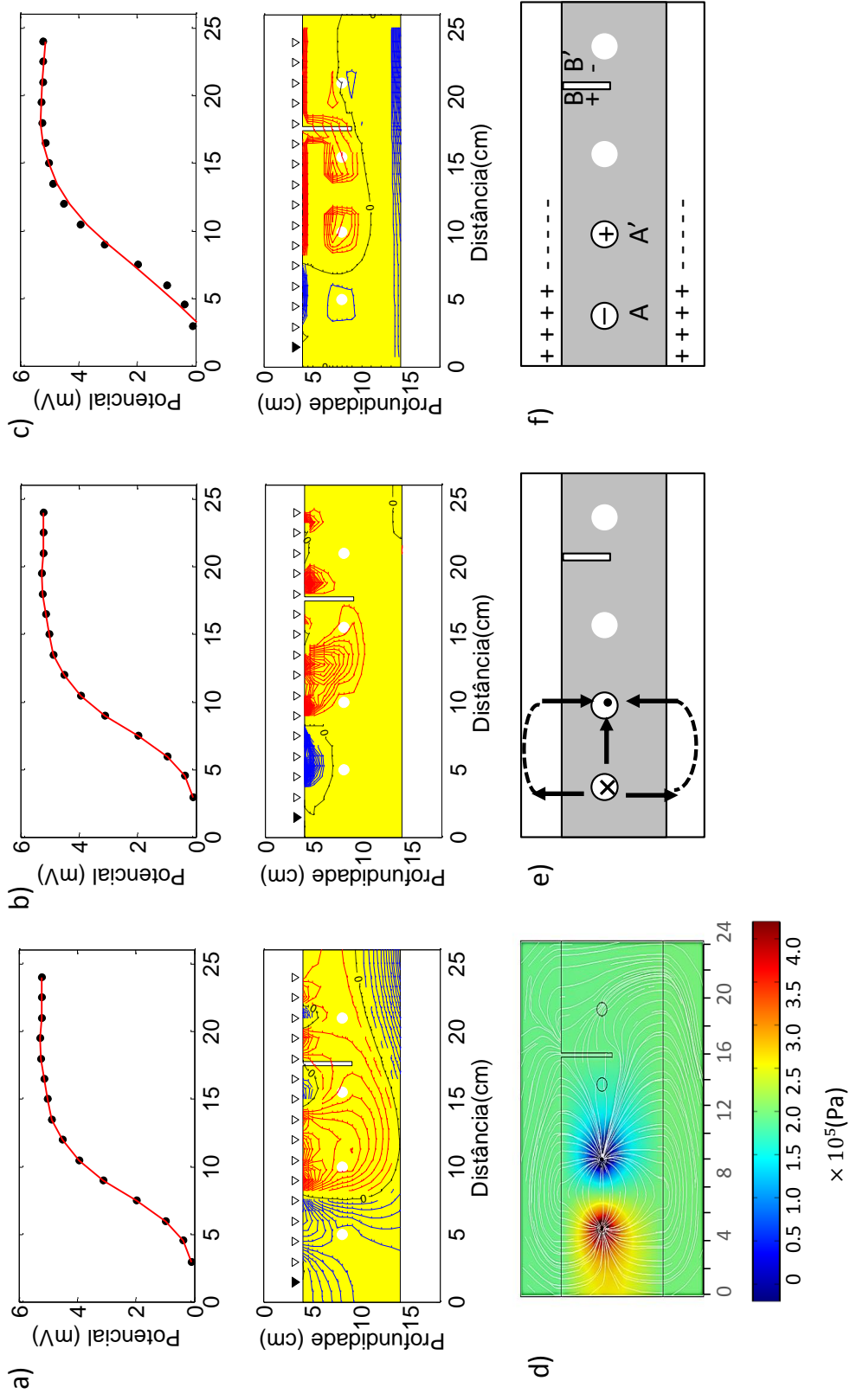


Figura 4.2: Resultado da inversão de dados, caso A-B, usando vínculos 1/z a), inversão compacta b) e vínculo de contraste c), polos de corrente (intervalos de contornos de $1 \mu A$) positivos (vermelho) e negativos (azul), e correspondente ajuste (linha vermelha) e dados medidos (círculos cheios). Figuras auxiliares para interpretação: d) modelagem de fluxo de água, e) modelo esquemático e f) distribuição de corrente.

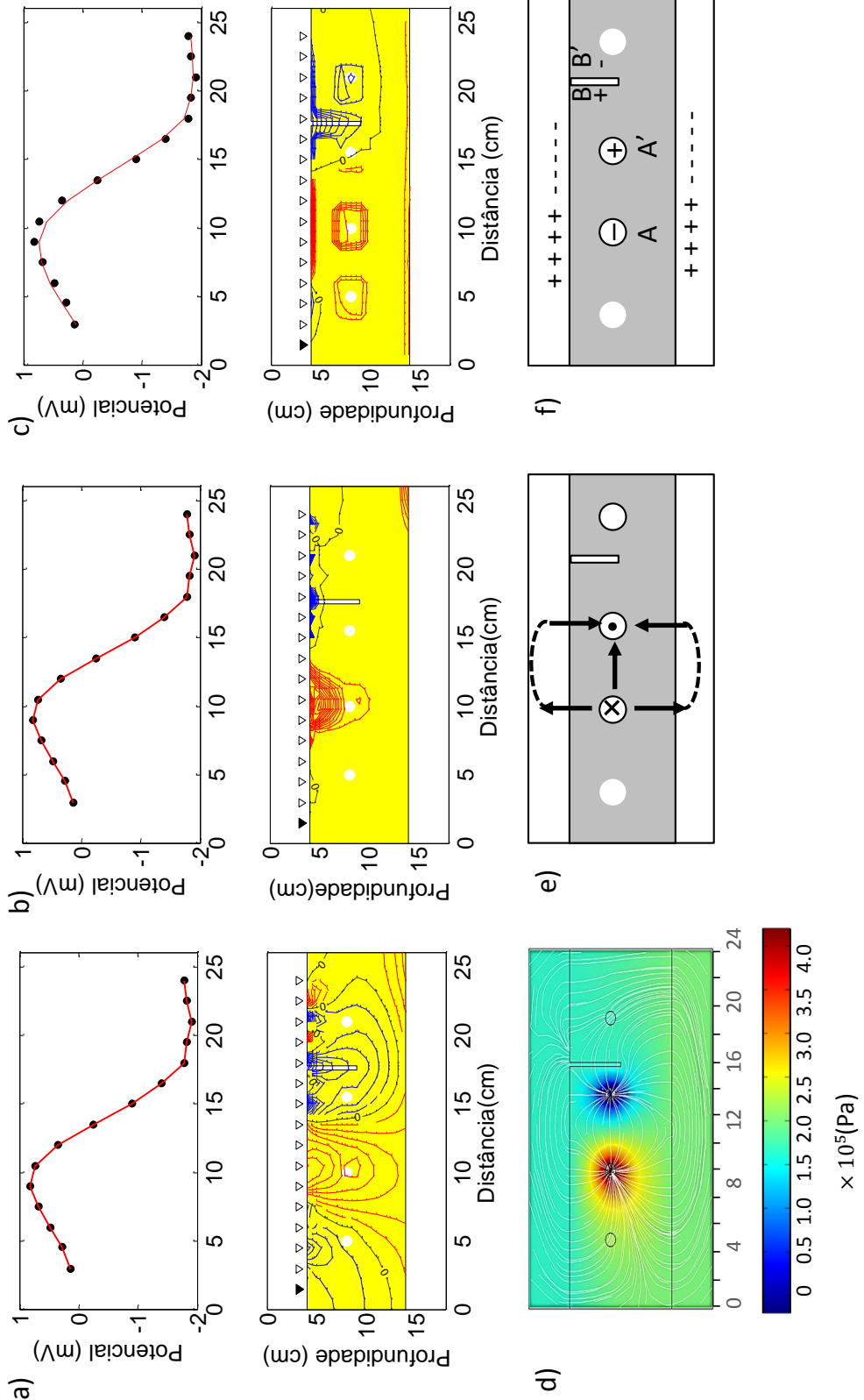


Figura 4.3: Resultado da inversão de dados, caso B-C, usando vínculos 1/z a), inversão compacta b) e vínculo de contraste c), polos de corrente (intervalos de contornos de $1 \mu A$) positivos (vermelho) e negativos (azul), e correspondente ajuste (linha vermelha) e dados medidos (círculos cheios). Figuras auxiliares para interpretação: d) modelagem de fluxo de água, e) modelo esquemático e f) distribuição de corrente.

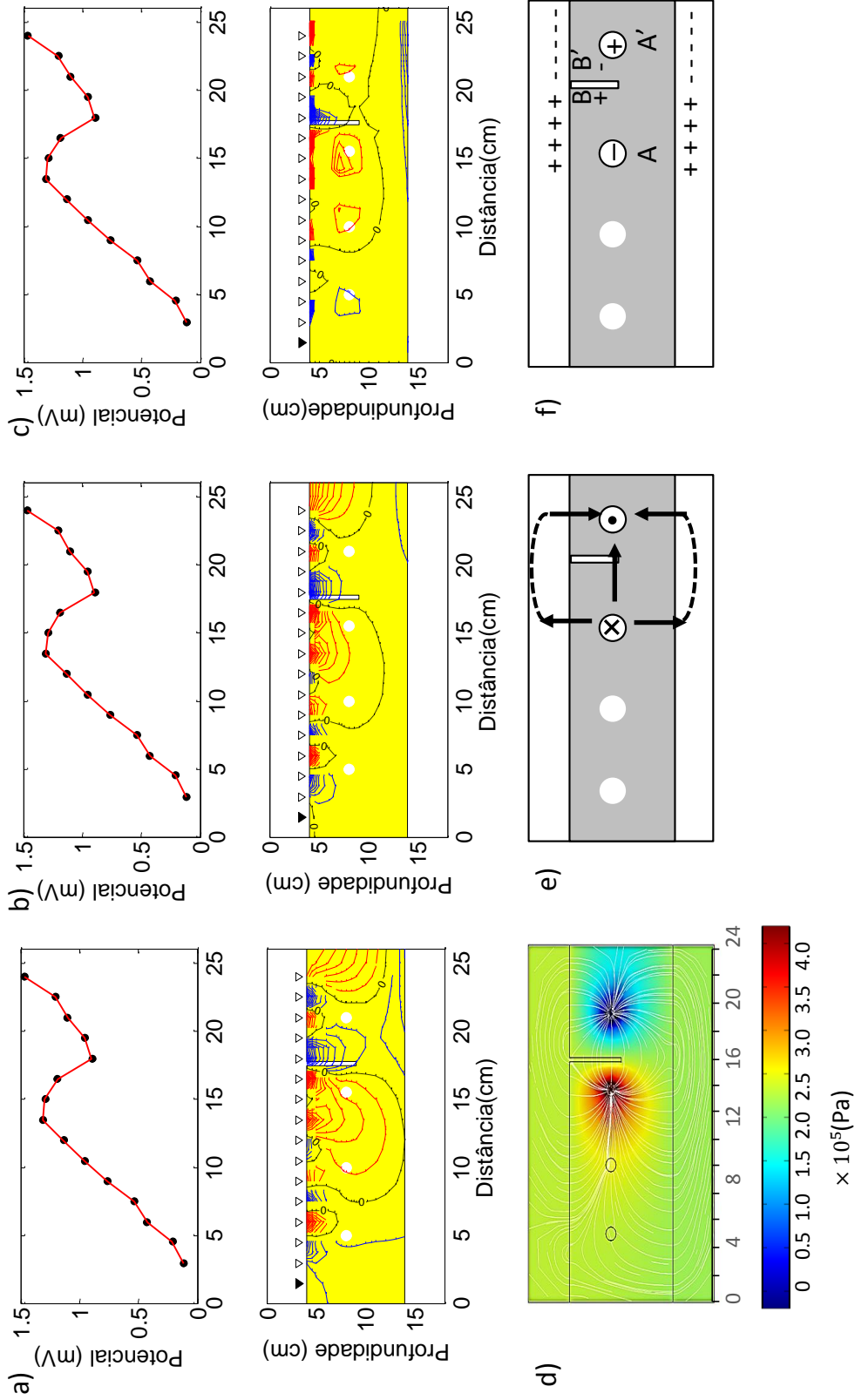


Figura 4.4: Resultado da inversão de dados, caso C-D, usando vínculos 1/z a), inversão compacta b) e vínculo de contraste c), polos de corrente (intervalos de contornos de $1 \mu\text{A}$) positivos (vermelho) e negativos (azul), e correspondente ajuste (linha vermelha) e dados medidos (círculos cheios). Figuras auxiliares para interpretação: d) modelagem de fluxo de água, e) modelo esquemático e f) distribuição de corrente.

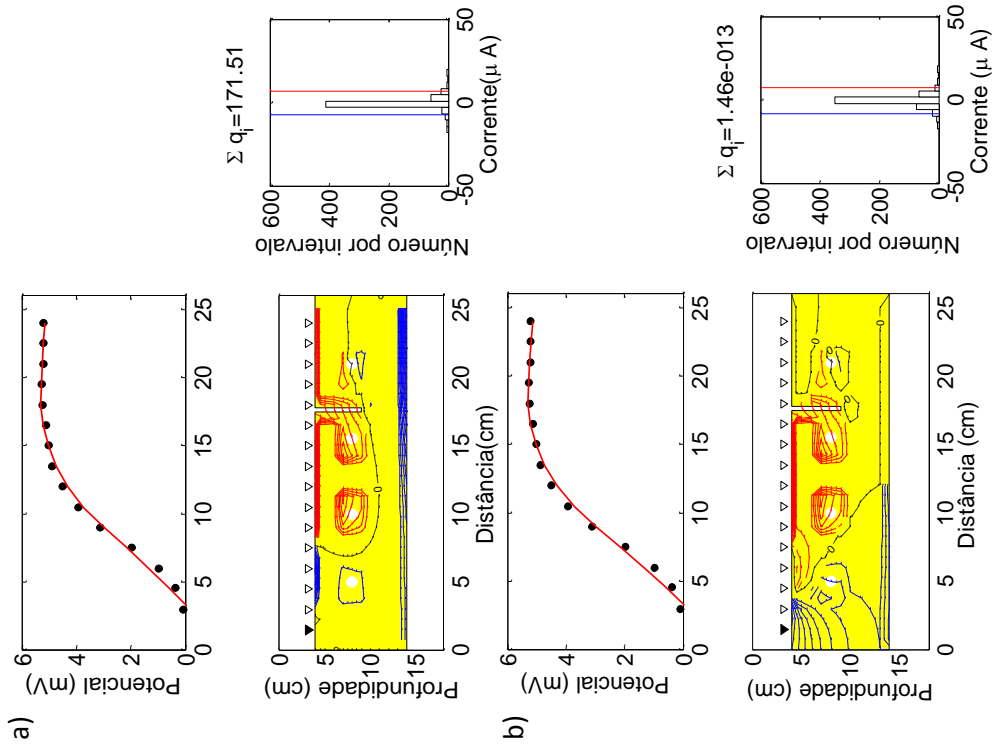


Figura 4.5: Resultados da inversão (caso A-B) com vínculo de contraste com efeito da sujeição à eletroneutralidade da somas de cargas. a) inversão com vínculo de contraste sem eletroneutralidade, b) resultado da inversão com vínculo de eletroneutralidade. O histograma à direita apresenta a distribuição dos valores de corrente obtidos na inversão.

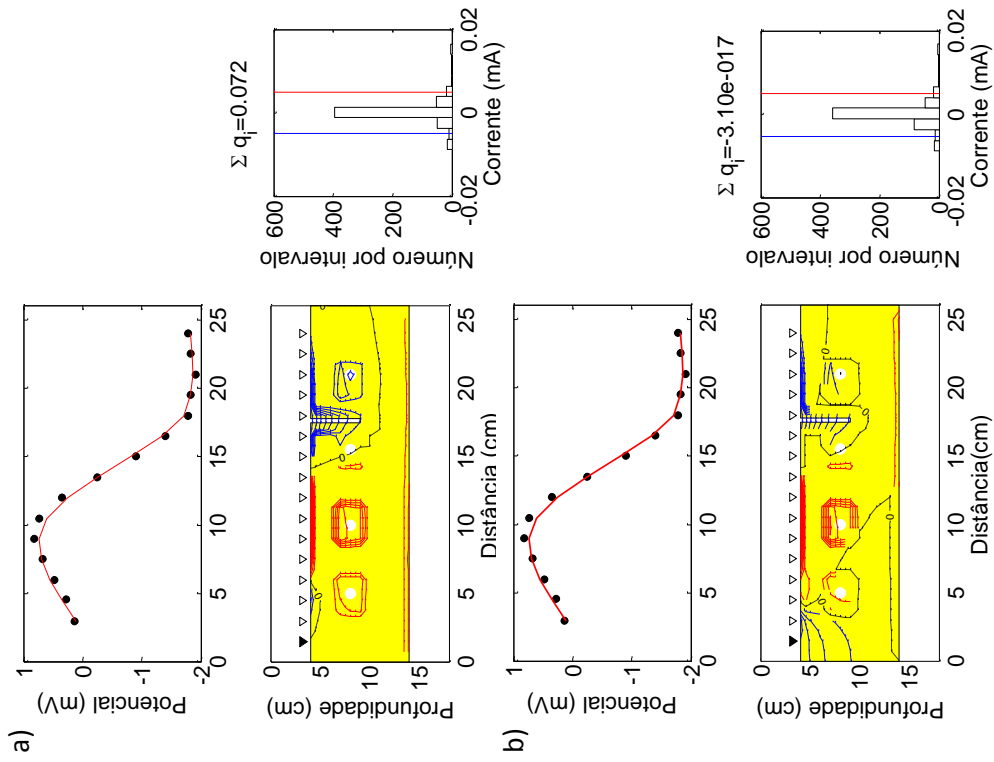


Figura 4.6: Resultado da inversão para o caso B-C; a) solução sem eletroneutralidade, a soma dos termos de corrente $171.51\mu\text{A}$, b) o total de corrente é 1.46×10^{-13} .

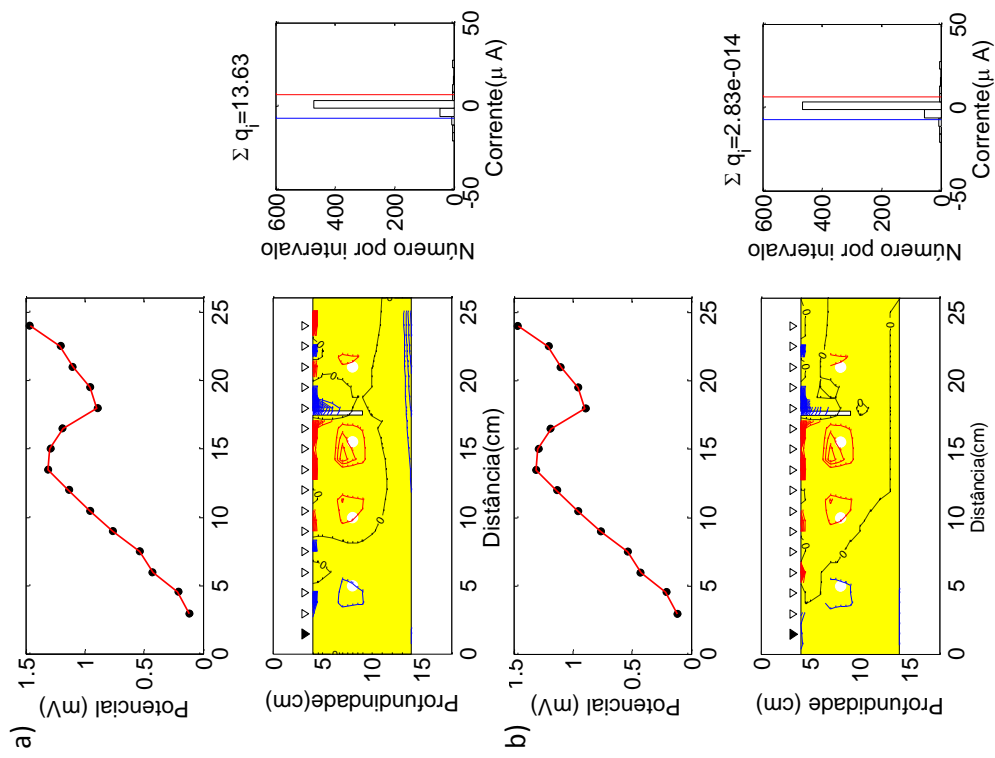


Figura 4.7: Resultado da inversão para o caso C-D, a) somente a inversão com vínculo de contraste não garante a soma de cargas nula, b) O vínculo de eletroneutralidade impõe que a soma de cargas é muito próxima de zero.

CAPÍTULO 5

Conclusões

Nosso trabalho experimental confirma a linearidade entre os potenciais elétricos e eletrocinéticos, mostrando a consistência das bases de dados. Os resultados verificam a premissa básica do imageamento de equivalência entre potenciais elétrico e eletrocinético em um meio homogêneo, resultantes, respectivamente de fontes pontuais de corrente e de injeção ou retirada de água. Esta equivalência mostra que é possível identificar se um meio é homogêneo aplicando medições dos potenciais elétrico e eletrocinético. Outra característica inferida para testes de bombeamento diz respeito às respostas esperadas a partir de uma descontinuidade. Nestes casos, além das fontes de corrente diretamente associadas aos pontos de injeção ou retirada, surgem fontes de corrente nas descontinuidades do meio.

A modelagem numérica dos campos elétrico e hidráulico mostram que as linhas de fluxo sofrem deformação marcante na proximidade da fratura e que há correspondência entre os campos elétrico e hidráulico apenas quando os fluxos ocupam um volume homogêneo do meio. Os resultados da modelagem numérica indicam que o fluxo hidráulico foge do padrão dipolar ao contrário do fluxo elétrico. O fluxo hidráulico forma subdomínios com circulação restrita, na qual as linhas de fluxo não se fecham nos pontos de bombeamento. Além disso, observa-se uma forte dependência do fluxo hidráulico com a proximidade dos pontos de injeção com a fratura. Em seus aspectos gerais (amplitude e polaridade das anomalias), o potencial eletrocinético pode ser representado por distribuições de corrente afetadas por descontinuidades e o mapeamento destas fontes pode determinar heterogeneidades na vizinhança de poços.

Como resultado dos testes de inversão nos dados de potencial espontâneo provenientes das medidas em tanque, confirmamos o vínculo de contraste (VC) como mais eficaz na identificação de descontinuidades no meio. Diante dos resultados constatamos a dificuldade da reconstituição da polaridade das fontes de corrente. Apesar disto, acreditamos na aplicabilidade do vínculo de contraste para a interpretação geológica de problemas de fluxo de água subterrânea.

Agradecimentos

Agradeço a todos as pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho em particular ao meu orientador Professor Carlos Alberto Mendonça pelas horas de trabalho dedicados e pela atenção em todos os momentos. Aos meus amigos e colegas de trabalho que fizeram parte da equipe de pesquisa, Sérgio Fachin, Eduardo Abreu e Nilton Silva. Também devo meu agradecimentos ao IAG/USP e aos professores que fizeram parte deste processo de formação profissional.

Referências

- Ahmed, A. S.; Jardani, A.; Revil, A. e Dupont, J. P. (2013) SP2DINV: A 2D forward and inverse code for streaming potential problems, *Computers & Geosciences*, **59**:9–16.
- Aizawa, K.; Ogawa, Y. e Ishido, T. (2009) Groundwater flow and hydrothermal systems within volcanic edifices: Delineation by electric self-potential and magnetotellurics, *Journal of Geophysical Research*, **114**:B01208.
- Al-Saigh, N.; Mohammed, Z. e Dahham, M. (1994) Detection of water leakage from dams by self potential method, *Engineering Geology*, **37**:115–121.
- Atekwana, E. A. e Slater, L. D. (2009) Biogeophysics: A new frontier in earth science research, *Rev. Geophys.*, **47**:RG4004.
- Bigalke, J. e Grabner, E. W. (1997) The geobattery model: a contribution to large scale electrochemistry, *Electrochimica Acta*, **42**:3443–3452.
- Bockris, J. M.; Reddy, A. K. N. e Gamboa-Aldeco, M. E. (2001) *Modern electrochemistry: Fundamentals of Electrode Processes*, Plenum Press, New York.
- Bogolovsky, V. A. e Ogilvy, A. A. (1972) The study of streaming potentials on fissured media models., *Geophysical prospecting*, **20**:109–117.
- Boldve, A.; Crespy, A.; Revil, A.; Janod, F. e Mattiuzzo, J. L. (2007) Streaming potentials of granular media: influence of dukhin and reynolds numbers., *Journal of Geophysical Research*, **112**:B08204.1–B08204.14.
- Bolève, A.; Revil, A.; Janod, F.; Mattiuzzo, J. e Jardani, A. (2007) Preferential fluid flow pathways in embankment dams imaged by self-potential tomography, *Hydrology and Earth system science*, **11**:1661–1671.
- Bolève, A.; Revil, A.; Janod, F.; Mattiuzzo, J. e Fry, J. (2009) Preferential fluid flow pathways in embankment dams imaged by self-potential tomography, *Near Surface Geophysics*, **5-6**:447–462.
- Castermant, J.; Mendonça, C. A.; Revil, A.; Trolard, F.; Bourrié, G. e Linde, N. (2008) Redox potential distribution inferred from self-potential measurements associated with the corrosion of a burden metallic body, *Geophysical Prospecting.*, **56**:269–282.
- Corwin, R. F. (1990) The self-potential method for environmental and engineering applications, In: S. H. Ward, ed., *Geotechnical and environmental geophysics*, pp. 127–145, Soc. of Expl. Geophys.

- Darnet, M.; Marquis, G. e Sailhac, P. (2003) Estimating aquifer hydraulic properties from the inversion of surface streaming potential (sp) anomalies, *Geophysical Research Letters.*, **30**.
- Delgado, A.; González-Caballero, F.; Hunter, R.; Koopal, L. e Lyklema, J. (2007) Measurement and interpretation of electrokinetic phenomena, *Journal of Colloid and Interface Science*, pp. 194 – 224.
- Dey, A. e Morrison, H. F. (1979) Resistivity modeling for arbitrary shaped two-dimensional structures, *Geophysical Prospecting*, **27**:106–136.
- Discacciati, M. e Quarteroni, A. (2009) Navier-stokes/darcy coupling: Modeling, analysis and numerical approximation, *Rev. Mat. Complut.*, **22**:315–426.
- Ehrhardt, M. (2012) Coupled fluid flow in Energy, Biology and Environmental research, E-book series Progress in Computational Physics (PiCP), 1. ed, vol.2, part. I, Bentham Science Publishers.
- Fachin, S. J. S.; Abreu, E. L.; Mendonça, C. A.; Revil, A.; Novaes, G. C. e Vasconcelos, S. S. (2012) Self-potential signals from an analog biogebattery model, *Geophysical Research Letters.*, **77**:EN29–EN37.
- Fagerlund, F. e Heison, G. (2003) Detecting subsurface groundwater flow in fractured rock using self-potential (sp methods), *Environmental Geology*, **43**:782–794.
- Fournier, C. (1989) Self-potential and resistivity surveys applied to hydrogeology in a volcanic area: case history of the chaîne des puys (puy-de-dôme, france), *Geophysical Prospecting.*, **37**:647–668.
- Glover, P. W. J. e Jackson, M. D. (2010) Borehole electrokinetics., *The Leading Edge*, **29**:724–728.
- Gorby, Y. A.; Yanina, S.; McLean, J. S.; Rosso, K. M.; Moyles, D. e Dohnalkova, A. (2006) Electrically conductive bacterial nanowires produced by shewanella oneidensis strain mr-1 and other microorganisms, *Proc. Natl. Acad. Sci USA*, **103**:11358–11363.
- Hansen, P. C. e O’Leary, D. P. (1993) The use of the l-curve in the regularization of discrete regularization of ill-posed problems, *SIAM J. SCI. COMPUT.*, **14**:No. 6, pp. 1487–1503,.
- Hase, H.; Hashimoto, T.; Sakanaka, S.; Kanda, W. e Tanaka, Y. (2005) Hydrothermal system beneath aso volcano as inferred from self-potential mapping and resistivity structure, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **143**:259–277.
- Ishido, T. (2004) Electrokinetic mechanism for the w-shaped self-potential profile on volcanoes, *Geophysical Research Letters*, **31**(L15616).
- Ishido, T. e Pritchett, J. W. (1999) Numerical simulation of electrokinetic potentials associated with subsurface fluid flow, *Journal of Geophysical Research*, **104**:15247–15259.

- Jardani, A.; Dupont, J. P. e Revil, A. (2006) Self-potential signals associated with preferential groundwater flow pathways in sinkholes, *Journal of Geophysical Research*, **111**:B09204.
- Jardani, A.; Revil, A.; Bolève, A.; Crespy, A.; Dupont, J.; Barrash, W. e Malama, B. (2007) Tomography of the darcy velocity from self-potential measurements, *Geophysical Research Letters*., **34**:L24403.
- Last, B. J. e Kubik, K. (1983) Compact gravity inversion, *Geophysics*, **48**:713–721.
- Li, Y. e Oldenburg, D. W. (1998) 3-d inversion of gravity data, *Geophysics*, **63**:109–119.
- Lide, D. R. (2005) *CRC-Handbook of Chemistry and Physics*, Internet Version, CRC Press.
- Maineult, A.; Strobach, E. e Renner, J. (2008) Self-potential signals induced by periodic pumping test., *Journal of Geophysical Research*, **113**:B01203.
- Malama, B.; Revil, A. e Kuhlman, K. L. (2009) A semi-analytical solution for transient streaming potentials associated with confined aquifer pumping tests, *Geophysical Journal International*., pp. 1007–1016.
- Marshall, D. J. e Madden, T. R. (1959) Induced polarization, a study of its causes, *Geophysics*, **24**(4):790–816.
- Masliyah, J. e Bhattacharjee, S. (2006) *Electrokinetic and colloidal transport phenonema*, Wiley-Interscience.
- Medeiros, W. E. e de Lima, O. A. L. (1999) Origem do potencial elétrico espontâneo em rochas cristalinas fraturadas e sua utilização na locação de poços, *Revista Brasileira de Geofísica*, **17**:103–115.
- Mendonça, C. A. (2008a) Forward and inverse self-potential modeling in mineral exploration., *Geophysics*, **73**:f33–F43.
- Mendonça, C. A. (2008b) Potencialidades do método do potencial espontâneo no estudo da biodegradação de contaminantes orgânicos., In. III simpósio Brasileiro de Geofísica.
- Mendonça, C. A.; Dotti, G. C.; Maida, C. e Silva, N. (2012) Tank experiments with borehole self-potential data., *Geophysics*, **77**:D1–D6.
- Minsley, B. J. (2007) *Modeling and inversion of Self-potential data*, PhD Thesis MIT, Massachusetts Institute of Technology.
- Minsley, B. J.; Sogade, J. e Morgan, F. D. (2007a) Three-dimensional self-potential inversion for subsurface *dnapl* contaminant detection at the savannah river site, south carolina, *Journal of Geophysical Research*, **112**:B02202.
- Minsley, B. J.; Sogade, J. e Morgan, F. D. (2007b) Three-dimensional source inversion of self-potential data, *Journal of Geophysical Research*, **112**:B02202.
- Morgan, F.; Williams, E. e Madden, T. (1989) Streaming potential properties of westerly granite with applications, *Journal of Geophysical Research*, **94**:12449–12461.

- Multiphysics, C. (2012) Reference Guide, v 4.3, COMSOL.
- Naudet, V.; Revil, A. e Bottero, J. Y. (2003) Relationship between self-potential(sp) signals and redox conditions in contaminated groundwater, *Geophysical Research Letters.*, **30**:NO. 21, doi:10.1029/2003GL018096.
- Nourbehecht, B. (1963) Irreversible Thermodynamic effects in inhomogeneous media and their applications in certain geoelectric problems, Massachusetts Institute of Technology, Colorado School of Mine.
- Ntarlagiannis, D.; Atekwana, E. A.; Hill, E. A. e Gorby, Y. (2007) Microbial nanowires: Is the subsurface nanowired?, *Geophys. Res. Lett.*, **34**:L17305.
- Onsager, L. (1931) Reciprocal relations in irreversible processes. i., *Phys. Rev.*, **37**(4):405–426.
- Panthulu, T.; Krishnaiah, C. e Shirke, J. (2001) Detection of seepage paths in earth dams using self-potential and electrical resistivity methods, *Engineering Geology*, **59**:281–295.
- Reguera, G.; McCarthy, K. D.; Mehta, T.; Nicoll, J. S.; Tuominen, M. T. e Lovley, D. R. (2005) Extracellular electron transfer via microbial nanowires, *Nature*, **435**:1098–1101.
- Revil, A. (2012) Spectral induced polarization of shaly sands: influence of the electrical double layer, *Water Resource Research.*, **48**:doi:10.1029/2011WR011260.
- Revil, A. e Saracco, G. (2003) The volcano-electric effect, *Journal of Geophysical Research*, **108**:2251.
- Revil, A.; Mendonça, C. A.; Atekwana, E. A.; Kulesa, B.; Hubbard, S. S. e Bohlen, K. J. (2010) Understanding biogeobatteries: Where geophysics meets microbiology, *Journal Geophysical Research.*, **115**:doi:10.1029/2009JG001065.
- Revil, A.; Karaoulis, M.; Johnson, T. e Kemma, A. (2012) Review:some low-frequency electrical methods for subsurface characterization and monitoring in hydrogeology, *Hydrogeology Journal.*, **20**:617–658.
- Rizzo, E.; Suski, B.; Revil, A.; Straface, S. e Troisi, S. (2004) Self-potential signals associated with pumping tests experiments., *Journal of Geophysical Research*, **109**:B10210.
- Rozycki, A.; Fonticciella, J. M. R. e Cuadra, A. (2006) Detection and evaluation of horizontal fractures in earth dams using the self-potential method, *Engineering Geology*, **82**:145–153.
- Sato, M. e Mooney, H. M. (1960) The electrochemical mechanism of sulfide self-potentials, *Geophysics*, **25**(01):226–249.
- Saunders, J. H.; Jackson, M. D. e Pain, C. C. (2008) Fluid flow monitoring in oil field using downhole measurements of eletrokinetic potencial., *Geophysics*, **73**:E165–E180.
- Sheffer, M. R. e Oldenburg, D. W. (2007) Three-dimensional modelling of streaming potential, *Geophysical Journal International*, **169**(3):839–848.

- Sill, W. R. (1983) Self-potential modeling from primary flows, *Geophysics.*, **48**:76–86.
- Silva, N. (2011) Estudo de Sinal Elétrico de Potencial Espontâneo Associado ao Fluxo de Água em Meios Porosos, IAG-Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade do Estado de São Paulo.
- Silva, N.; Vasconcelos, S. S. e Mendonça, C. A. (2012) Constraints for mapping subsurface current sources., Submetido para publicação.
- Sivenas, P. e Beales, F. W. (1982) Natural geobatteries associated with sulphide ore deposits. 1. theoretical studies, *Journal of Geochemical exploration*, **17**:123–143.
- Snieder, R.; Hubbard, S.; Haney, M.; Bawden, G.; Hatchell, P.; Revil, A. e Geophysical Monitoring Working Group, D. (2007) Advanced noninvasive geophysical monitoring techniques, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **35**(1):653–683.
- Stoll, J.; Bigalke, J. e Grabner (1995) Electrochemical modeling of self-potential anomalies, *Survey in Geophysics*, **16**:107–120.
- Straface, S.; Fallico, C.; Troisi, S.; Rizzo, E. e Revil, A. (2007) An inverse procedure to estimate transmissivity from heads and sp signals., *Groundwater*.
- Telford, W. M.; Geldart, L. P.; Sheriff, R. E. e Keys, D. A. (1976) *Applied Geophysics*, Cambridge Un. Press, Cambridge.
- Tikhonov, A. N. e Arsenin, V. Y. (1977) *Solutions of ill-posed problems*, Wiley, ISBN 0470991240.
- Titov, K.; Ilyin, Y.; Konosavsky, P. e Levitsk, A. (2002) Electrokinetic spontaneous polarization in porous media: petrophysics and numerical modeling., *Journal of Hydrology*, **267**:207–216.
- Titov, K.; Revil, A.; Konosavsky, P.; Straface, S. e Troisi, S. (2005) Numerical modeling of self-potential signals associated with a pumping test experiment., *Geophysical Journal International*, **162**:641–650.
- Vichabian, Y. e Morgan, F. D. (2002) Self potentials in cave detection, *The Leading Edge*, **9**:866–871.
- Wurmstich, B. e Morgan, F. D. (1994) Modeling of streaming potentials responses caused by oil well pumping., *Geophysics*, **59**:46–56.