

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO**

Este exemplar corresponde a redação final  
da tese defendida por Rosane  
Oliveira Mota e aprovada  
pela comissão julgadora em 19 12 19 94

  
ORIENTADOR

**Dissertação Apresentada à  
Faculdade de Engenharia Mecânica  
Como Requisito Parcial para a Obtenção do  
Título de Mestre em Engenharia de Petróleo**

**EFEITOS DA CORRENTE ELÉTRICA  
CONTÍNUA NA RECUPERAÇÃO  
DE PETRÓLEO**

**Autora: Rosane Oliveira Mota 856  
Orientador: Osvaldo Vidal Trevisan 7  
Co-orientador: Euclides José Bonet 7**

56/94

**Dezembro de 1994**

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	T) Unicamp
	M 856 e
V.	Ex.
TOMBO BC/	23465
PRINC.	433/95
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	02/02/95

CM-00065473-4

FICHA CATALOGRAFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA CENTRAL - UNICAMP

Mota, Rosane Oliveira

M856e

Efeitos da corrente elétrica continua na recuperação de petróleo / Rosane Oliveira Mota. - - Campinas, SP : [s.n.], 1994.

Orientadores : Osvaldo Vidal Trevisan, Euclides Jose Bonet.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas,  
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica.

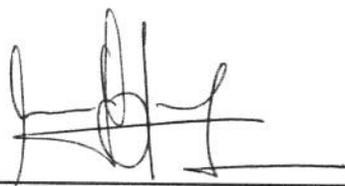
1. Eletrose. 2. Dupla camada elétrica. 3. Recuperação secundária de petróleo. 4. Escoamento bifásico. I. Trevisan, Osvaldo Vidal. II. Bonet, Euclides Jose. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. IV. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO**

A dissertação "Efeitos da Corrente Elétrica Contínua na Recuperação de Petróleo" elaborada por Rosane Oliveira Mota foi aceita pela Subcomissão de Pós-Graduação em Engenharia de Petróleo como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Petróleo.

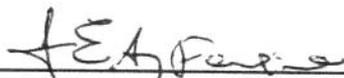
**Campinas, 19 de dezembro de 1994**

**Banca Examinadora**



---

**Osvaldo Vidal Trevisan, Ph.D.**



---

**Luiz Eraldo Araújo Ferreira, Ph.D.**



---

**Roberto Francisco Mezzomo, Ph.D.**

*Ao meu filho Artur,  
alegria da minha vida.*

## AGRADECIMENTOS

*A Deus, pela proteção em todos os momentos.*

*Aos meus pais, Rosa Luísa e Walter, pelo incentivo e apoio constantes.*

*À minha avó Luiza, pela ajuda no momento mais necessário.*

*Ao Prof. Dr. Osvaldo Vidal Trevisan, pela orientação eficiente e pela confiança sempre demonstrada.*

*Ao Prof. Euclides José Bonet, pelo conhecimento e experiência transmitidas e pela presença constante no laboratório, de fundamental importância para a realização deste trabalho.*

*Ao Luiz Benedicto Pompeo Neto, pela cultura e sabedoria exemplares.*

*Ao Nelson Rivera Fernandes, pelas idéias interessantes e pela competência na confecção das peças necessárias ao experimento.*

*Ao Eric Frederico Hodge, pela participação interessada e construtiva, e pela elaboração dos desenhos esquemáticos.*

*Aos professores Armando Márcio Coimbra (IGUSP), Fernando Gallemebeck (IQ - UNICAMP), Rodnei Bertazzoli (FEM-UNICAMP), Pizzolato Filho (FEE-UNICAMP) e à Dra. Sylvia Maria Couão Anjos (PETROBRÁS/CENPES), pela gentil cessão de materiais, equipamentos e realização de análises em seus laboratórios.*

*Aos colegas e funcionários do Departamento de Engenharia de Petróleo da FEM-UNICAMP, pelo respeito e simpatia sempre demonstrados.*

*À turma de Geo-Engenharia de Reservatórios, pela lição de solidariedade.*

*A Maria de Lourdes e Jussara, grandes amigas.*

*Ao José Artur, pelo carinho e dedicação.*

## RESUMO

A aplicação de corrente elétrica visando a melhoria na recuperação de petróleo tem sido objeto de algumas patentes e as pesquisas têm enfatizado apenas efeitos de aquecimento do meio poroso com a conseqüente redução da viscosidade do óleo. Entretanto, há indicações da existência de outros efeitos, além do aquecimento.

Neste trabalho foram investigados os efeitos da aplicação de um campo elétrico contínuo sobre o escoamento e a importância destes efeitos na recuperação de petróleo, verificando a ocorrência de eletro-osmose e/ou alteração na estrutura das argilas devido ao tratamento eletroquímico em uma série de experimentos laboratoriais em meios porosos lineares saturados com óleo e água.

São descritos detalhadamente o projeto e a montagem do aparato experimental, a programação dos testes, o procedimento de medidas, e o tratamento de dados utilizados. Valores medidos para coeficientes de permeabilidade eletro-osmótica para meios porosos em diversos níveis de saturação de água são apresentados.

Os resultados encontrados são apresentados sob a forma de curvas de recuperação de óleo, curvas de permeabilidades relativas, e curvas de razão água-óleo de produção, nas quais pode ser observado o efeito favorável da passagem da corrente elétrica contínua na produção adicional de óleo e na redução da razão água-óleo de produção.

## ABSTRACT

Many patents have been published about the effect of applying electrical potentials in order to enhance oil recovery.

These investigations emphasize only heating effects that causes, in consequence, oil viscosity reduction. However, there are indications of the influence of other effects.

The aim of this work was to investigate the effects of applying a direct electrical field and to measure its significance in oil recovery through electro-osmosis and/or physical-chemical modifications on clay structure due to the electrochemical treatment.

A series of laboratory experiments was conducted with linear porous media saturated with oil and water.

The design and construction of the apparatus, along with the experimental procedures and data treatment are described in detail.

Values for the coefficient of electro-osmotic permeability for porous media in different water saturation stages are also presented.

Results are presented as graphics such as oil recovery curves, relative permeability curves and production water-oil ratio curves.

In the results, it may be noted the beneficial effect of the electrical current in additional oil recovery and in the production water-oil ratio reduction.

# Conteúdo

## 1 INTRODUÇÃO

- 1.1 Motivação .....
- 1.2 Revisão bibliográfica.....

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

- 2.1 Escoamentos em meios porosos.....
  - 2.1.1 Escoamentos diretos .....
  - 2.1.2 Escoamentos acoplados .....
- 2.2 Efeitos elétricos.....
- 2.3 A dupla camada elétrica .....

  - 2.3.1 Modelo de Helmholtz-Perrin .....
  - 2.3.2 Modelo de Gouy-Chapman.....
  - 2.3.3 Modelo de Stern .....
  - 2.3.4 Modelo de Bockris, Devanathan e Muller.....

- 2.4 A eletro-osmose.....
  - 2.4.1 Quantificação da eletro-osmose para fluxo monofásico .....
  - 2.4.2 Teorias para a eletro-osmose .....
    - 2.4.2.1 Teoria de Helmholtz-Smoluchowski .....
    - 2.4.2.2 Teoria de Schmid.....
    - 2.4.2.3 Modelo de fricção de Spiegler .....
    - 2.4.2.4 Teoria da hidratação de íons .....
- 2.5 Eletroquímica .....

<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	
3.1	Aparato experimental - projeto e montagem.....	29
3.2	Preparo das Amostras.....	33
3.3	Fluidos utilizados.....	42
3.4	Programação dos testes.....	43
3.5	Procedimentos.....	45
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>52</b>
4.1	Testes definitivos.....	52
4.1.1	Teste 1.....	52
4.1.2	Teste 2.....	52
4.1.3	Teste 3.....	57
4.1.4	Teste 4.....	59
4.1.5	Teste 5.....	61
4.1.6	Teste 6.....	63
4.1.7	Teste 7.....	64
4.1.8	Teste 8.....	65
4.1.9	Teste 9.....	68
4.1.10	Teste 10.....	70
4.2	Efeito dos fluidos e do campo elétrico sobre os argilominerais.....	73
4.3	Análise conjunta dos resultados.....	74
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>84</b>
<b>6</b>	<b>NOMENCLATURA</b> .....	<b>95</b>
<b>7</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>98</b>

## Lista de Figuras

2.1	Escoamentos diretos.....	7
2.2	Fenômenos eletrocínéticos.....	9
2.3	Modelo de Helmholtz-Perrin para a dupla camada elétrica.....	11
2.4	Modelo de Gouy-Chapman para a dupla camada elétrica.....	12
2.5	Modelo de Stern para a dupla camada elétrica.....	13
2.6	Modelo de Bockris, Devanathan e Muller para a dupla camada elétrica	14
2.7	Instalações de campo do projeto de secagem eletro-osmótica na construção da represa de North West Branch, Ohio, EUA.....	16
2.8	Projeto para estabilização da Torre de Pisa, Itália, por eletro-osmose....	17
2.9	Teoria de Helmholtz-Smoluchowski para a eletro-osmose.....	20
2.10	Teoria de Schmid para a eletro-osmose.....	24
2.11	Célula eletroquímica, representando hidrólise da água.....	28
3.1	Desenho esquemático do conjunto de equipamentos e aparato experimental.....	31
3.2	Fotografia do painel de controle de pressão.....	32
3.3	Fotografia de uma amostra de meio poroso antes do encapsulamento com resina epoxi.....	35
3.4	Fotografia de uma amostra após encapsulamento com resina epoxi, tendo sua permeabilidade absoluta medida no permeabilímetro a gás.....	36
3.5	Fotografia de amostras após encapsulamento com resina epoxi e medição de permeabilidade absoluta.....	37
3.6	Desenho esquemático dos componentes do conjunto amostra-células....	38
3.7	Fotografia das flanges de acrílico do aparato experimental.....	39
3.8	Fotografia do meio poroso artificial que preencheu as câmaras de acrílico.....	40

3.9	Fotografia do aparato experimental: meio poroso encapsulado e células eletroquímicas .....	40
3.10	Fotografia do conjunto aparato - equipamentos-instrumentos.....	41
3.11	Fotografia do aparato experimental dentro da estufa termostatzada .....	42
3.12	Eficiência eletro-osmótica em função da concentração da solução eletrolítica.....	47
4.1	Produção acumulada de óleo e água, teste 1 - Querosene-Rodada Base.....	54
4.2	Curvas de permeabilidades relativas para o sistema óleo-água, teste 1 .....	55
4.3	Produção acumulada de óleo e água, teste 2 - Querosene-Configuração 1 .....	56
4.4	Curvas de permeabilidades relativas para o sistema óleo-água, teste 2 .....	57
4.5	Produção acumulada de óleo, teste 3 - Querosene-Configuração 2 .....	58
4.6	Produção acumulada de óleo e água, teste 4 - óleo de Dom João - Rodada Base.....	59
4.7	Curvas de permeabilidades relativas para o sistema óleo-água, teste 4 .....	60
4.8	Produção acumulada de óleo e água teste 5 - óleo de Dom João - Configuração 1 .....	61
4.9	Curvas de permeabilidades relativas para o sistema óleo-água, teste 5 .....	63
4.10	Produção acumulada de óleo e água teste 6 - óleo de Dom João - Configuração 2 .....	64
4.11	Produção acumulada de óleo, teste 7 - Querosene - Configuração 2 (repetição).....	65
4.12	Produção acumulada de óleo e água, teste 8 - óleo de Dom João - Rodada Base (repetição).....	66

4.13	Curvas de permeabilidades relativas para o sistema óleo-água, teste 8 (regressão).....	67
4.14	Curvas de permeabilidades relativas para o sistema óleo-água, teste 8.....	67
4.15	Produção acumulada de óleo e água, teste 9 - óleo NUJOL.....	69
4.16	Produção acumulada de óleo e água, teste 10 - óleo de Dom João - Configuração 1 (repetição).....	71
4.17	Curvas de permeabilidades relativas para o sistema óleo-água, teste 10.....	72
4.18	Coefficientes de permeabilidade eletro-osmótica em função da saturação de água.....	74
4.19	Razão água-óleo para os testes com querosene.....	75
4.20	Razão água-óleo para o teste com o óleo NUJOL.....	76
4.21	Razão água-óleo para os testes com o óleo de Dom João.....	77
4.22	Vazão de injeção para os testes com querosene.....	78
4.23	Vazão de injeção para o teste com o óleo NUJOL.....	78
4.24	Vazão de injeção para os testes com o óleo de Dom João.....	79
4.25	Curvas de Recuperação para os testes com querosene.....	80
4.26	Curva de Recuperação para o teste com o óleo NUJOL.....	81
4.27	Curvas de Recuperação para os testes com o óleo de Dom João.....	82
5.1	Variação da voltagem com a distância durante a eletro-osmose, para escoamento unidimensional e radial .....	84
B.1	Viscosidade em função da temperatura para o querosene.....	90
B.2	Viscosidade em função da temperatura para o óleo de Dom João.....	90
B.3	Viscosidade em função da temperatura para a solução salina (1000 ppm NaCl).....	91
B.4	Viscosidade em função da temperatura para o óleo NUJOL.....	91

## Lista de Tabelas

2.1	Escoamentos acoplados .....	8
3.1	Características de permo-porosidade das amostras.....	45
3.2	Capacidade de troca catiônica dos argilominerais.....	48
3.3	Características e programação dos testes.....	51
4.1	Coeficientes de permeabilidade eletro-osmótica medidos.....	53
4.2	Medição de permeabilidade efetiva à água antes da passagem de corrente elétrica, teste 10.....	73
4.3	Medição de permeabilidade efetiva à água após a passagem de corrente elétrica, teste 10.....	73

## Lista de Anexos

A	Condutividade hidráulica.....	86
B	Dados dos fluidos utilizados.....	88
C	Relação entre condutividade hidráulica e permeabilidade eletro-osmótica, com dados do teste 2.....	92
D	Requisitos de energia - Equivalência entre potência hidráulica e potência elétrica.....	93

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação

A produção convencional de petróleo envolve basicamente o fluxo de matéria (óleo, água, gás natural, íons, sólidos em suspensão) através do meio poroso que a armazena (as rochas-reservatório).

Devido aos efeitos de superfície causados pela característica de não-miscibilidade entre os hidrocarbonetos e a fase aquosa, e à heterogeneidade das rochas sedimentares, a eficiência da recuperação convencional é em geral muito baixa, situando-se em média na faixa de 20 a 30% do óleo "in place".

Indicações de melhoria na produção de petróleo e alterações físico-químicas das reações fluido-fluido e fluidos-rochas sob aplicação de métodos elétricos têm motivado o desenvolvimento de pesquisas na área.

Entre os efeitos resultantes da aplicação de campo elétrico, abordados na literatura, são destacados os efeitos eletrocinéticos, os efeitos eletroquímicos, os efeitos de aquecimento, e os efeitos eletro-hidrodinâmicos.

A aplicação de corrente elétrica visando a melhoria na recuperação de petróleo tem sido objeto de algumas patentes e as investigações têm enfatizado apenas efeitos de aquecimento do meio poroso com conseqüente redução de viscosidade do óleo. Entretanto, há indicações da existência de outros efeitos, além do aquecimento.

Este trabalho teve como objetivo investigar os efeitos da aplicação de campos elétricos sobre o escoamento e sua importância na recuperação de petróleo, verificando a ocorrência de eletro-osmose e/ou alteração na estrutura das argilas devido ao tratamento eletroquímico em uma série de experimentos laboratoriais em meios porosos lineares saturados com óleo e água.

## 1.2 Revisão bibliográfica

A primeira experiência envolvendo fenômenos eletrocinéticos da qual há registro foi desenvolvida pelo físico russo REUSS, em 1807. Em seu experimento, Reuss observou a migração eletrocinética no anodo e o fenômeno de eletro-osmose no catodo.

Em 1852, WIEDEMANN produziu as primeiras medidas quantitativas precisas de vazão de líquido fluindo através de membranas porosas de argila, sob a ação de uma corrente elétrica conhecida. Ele demonstrou que a vazão é proporcional à corrente elétrica, ou correspondentemente, se o fluxo é impedido, resulta uma pressão eletro-osmótica também proporcional à corrente.

Em 1859, QUINCKE observou que eletro-osmose e potencial de corrente eram fenômenos inversos. Ele explicou esses fenômenos com base no modelo da dupla camada elétrica, ou seja, uma segregação de cargas positivas e negativas na direção normal à interface resultante do contato entre duas fases de cargas opostas.

HELMHOLTZ (1879) colocou essas leis e teorias em forma matemática para modelar o fenômeno em um único tubo capilar.

SMOLUCHOWSKI (1903) corrigiu e generalizou a equação de HELMHOLTZ para eletro-osmose para um feixe de capilares ou um meio poroso qualquer.

CASAGRANDE (1941, 1952, 1959) foi o pioneiro na aplicação da eletro-osmose, em engenharia, para secagem e estabilização de taludes. Em seus cálculos, ele considerou o coeficiente eletro-osmótico constante e denominou-o de coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica ( $k_e$ ), dado em cm/s por volt/cm.

WINTERKORN (1947, 1955) sugeriu uma generalização da lei de Darcy para incluir as contribuições dos gradientes elétrico e térmico.

BALLOU (1955) investigou o escoamento eletro-osmótico da água em sistemas homogêneos da argila caulinita. Os resultados foram comparados com as previsões dadas através de diversas teorias para o escoamento eletro-osmótico. As relações entre as vazões eletro-osmóticas e as permeabilidades

hidráulicas foram compatíveis com as equações eletrocinéticas de Helmholtz-Smoluchowski.

Na área de engenharia de reservatórios de petróleo, AMBA (1963) e AMBA & CHILINGAR & BEESON (1964) foram os primeiros pesquisadores a publicar resultados de testes laboratoriais. Nestes trabalhos, foram usadas amostras de meios porosos sintéticos, contendo várias porcentagens de diferentes tipos de argilas, nas quais foram injetadas soluções eletrolíticas de diferentes tipos. Foi medida a vazão de fluidos durante a aplicação de corrente elétrica contínua sob diversas intensidades de corrente. Os resultados indicaram que o aumento na vazão de líquidos foi devido não só ao efeito eletro-osmótico, como também devido a alteração na estrutura dos poros. Essas alterações na configuração dos poros ocorreram durante o tratamento eletroquímico e resultaram, geralmente, em uma permeabilidade final mais elevada. Como resultado das modificações físico-químicas nas propriedades das argilas, a tendência das argilas absorverem água e incharem foi drasticamente reduzida.

TIKHOMOLOVA (1964) comparou a expulsão capilar (embebição vertical) com a expulsão eletro-osmótica, provocada pela superposição de campo elétrico contínuo ao sistema. Os efeitos sobre o deslocamento de querosene apolar por uma solução aquosa 0,005N de KCl, foram investigados em diafragmas de partículas de quartzo. As variáveis medidas foram: vazão de transporte eletro-osmótico, altura máxima de pressão eletro-osmótica, pressão de expulsão do querosene pela solução de KCl e velocidade de expulsão por forças capilares e por eletro-osmose. Ela observou que a eletro-osmose causa um aumento considerável na vazão dos fluidos, efeito esse tanto maior quanto menores os diâmetros dos poros.

GRIGOROV & TIKHOMOLOVA (1965) pesquisaram o efeito do gradiente de potencial elétrico aplicado a um sistema, assim como os efeitos da natureza e da concentração de tensoativos em querosene apolar e em petróleo, sobre a velocidade de deslocamento destes por solução aquosa 0.005 N de KCl. Os testes foram realizados comparando-se embebição horizontal e eletro-osmose. Segundo os autores, o efeito do deslocamento eletro-osmótico dos óleos é tanto maior quanto maior o gradiente de potencial aplicado e a concentração e peso molecular do tensoativo presente no óleo.

ADAMSON (1966), além de pesquisar a possibilidade de utilização da corrente elétrica contínua em conjunto com eletrólitos para melhorar características de solos, investigou também a possibilidade de aumento de recuperação de petróleo durante as fases primária e secundária de produção, prosseguindo os estudos de AMBA.

De modo a testar os aspectos teóricos existentes sobre a eletro-osmose, tais como o "princípio da reciprocidade de Onsager" e a "lei de Saxon", por exemplo, GRAY (1966, 1967) realizou trabalhos laboratoriais com sistemas argila/água. Foi investigado também o efeito da variação sistemática de certos parâmetros-chave nos processos eletrocinéticos; nestes sistemas, os parâmetros de especial interesse foram: teor de água, capacidade de troca iônica, e concentração da solução eletrolítica. Nos seus experimentos, foram tomadas diversas precauções de modo a eliminar ou suprimir a um nível desprezível os efeitos decorrentes da aplicação prolongada de corrente contínua através do meio poroso, tais como: formação de gás nos eletrodos, alterações físico-químicas das argilas e aquecimento; entre essas, foram citadas: limitação da densidade de corrente em menos de 35 microampéres por centímetro quadrado e limitação do tempo de aplicação da corrente elétrica em menos de 15 minutos.

Em 1970, CHILINGAR, EL-NASSIR & STEVENS estudaram os efeitos da corrente contínua na permeabilidade de arenitos. Eles testaram amostras sintéticas submetidas a fluxo de eletrólitos e também a fluxo de querosene através da amostra previamente saturada com solução aquosa. Seus resultados mostraram que a vazão após o tratamento elétrico, sob descontinuidade de fluxo de corrente, é maior que a vazão inicial. Em sistema bifásico, submetido a pressão ou vazão de água constantes, a vazão e permeabilidade relativa ao querosene aumentaram sob aplicação de corrente contínua.

Alguns modelos teóricos, simplificados para eletro-osmose e comportamento de sistemas argila-água-eletrólitos podem ser encontrados em MITCHELL (1976).

FLEUREAU (1979) investigou a influência da temperatura e da eletricidade sobre o escoamento de líquido em meios porosos contendo argilas, estudando as interações sólido-líquido e líquido-líquido para os casos monofásico e bifásico. Nos seus experimentos a montagem do aparato permitia o contato entre produtos das reações de eletrólise com a solução salina presente no meio

poroso, possibilitando assim a formação de tensoativos "*in situ*", que podem ser responsáveis por uma parcela de recuperação adicional.

Pesquisa laboratorial extensiva foi realizada por LOCKHART (1982) acerca dos efeitos da voltagem aplicada, tipos de argila, cátions intercambiáveis, e materiais dos eletrodos na secagem de argilas. Nesse trabalho, contrariamente às expectativas tradicionais, ele concluiu que concentrações relativamente elevadas de eletrólitos não são necessariamente prejudiciais à secagem eletro-osmótica, podendo até mesmo ser benéficas.

Após relativamente pouca atenção aos escoamentos acoplados em solos, por alguns anos, recentemente houve um renovado interesse no assunto devido a novos problemas e aplicações nos quais eles desempenham papel importante. Esses incluem transporte de contaminantes no solo, limpeza e despoluição de solos e de aquíferos, e medição de propriedades de solo "*in situ*", conforme BRUELL & SEGALL & WALSH (1992) e HAMED & ACAR & GALE (1992).

Ainda na área de engenharia de petróleo, AGGOUR & MUHAMMADAIN (1992) obtiveram resultados positivos na pesquisa laboratorial acerca do efeito do gradiente de potencial elétrico na recuperação de petróleo, produção de água, e razão água-óleo durante injeção de água. Estes experimentos foram conduzidos usando um modelo linear, empacotado com areia de 30-40 mesh, utilizando óleo de 28,7 graus API e água com salinidade de 30000 ppm de NaCl. Ele observou que os efeitos só foram consideráveis após a erupção de água. Trabalhando posteriormente com arenito Berea, óleo árabe leve e água com salinidade de 2000 ppm de NaCl, AGGOUR & TCHELEPI (1994) obtiveram curvas de permeabilidades relativas água-óleo favoráveis à recuperação de petróleo à medida que o gradiente de potencial elétrico aumentou, de 0 a 3 volts/cm.

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 Escoamentos em meios porosos:

#### 2.1.1 Escoamentos diretos

MITCHELL (1991), ao proferir a 31ª palestra Rankine na "British Geotechnical Society", mostra que podem ser identificados 4 tipos de escoamentos diretos, cujos fluxos são causados por um gradiente da mesma natureza; são eles : os escoamentos hidráulico, elétrico, térmico, e químico. Estes escoamentos são regidos pelas seguintes leis:

- *para fluxo de fluidos* (LEI DE DARCY) :

$$q_h = k_h \cdot i_h \quad (2.1)$$

- *para fluxo de calor* (LEI DE FOURIER) :

$$q_t = k_t \cdot i_t \quad (2.2)$$

- *para fluxo de eletricidade* (LEI DE OHM) :

$$I = \sigma_e \cdot i_e \quad (2.3)$$

- *para escoamento químico* (LEI DE FICK) :

$$J_D = D \cdot i_C \quad (2.4)$$

As expressões acima podem ser genericamente expressas como :

$$J_i = L_j \cdot X_i \quad (2.5)$$

A Figura 2.1 ilustra esquematicamente os 4 tipos de escoamentos acima citados.

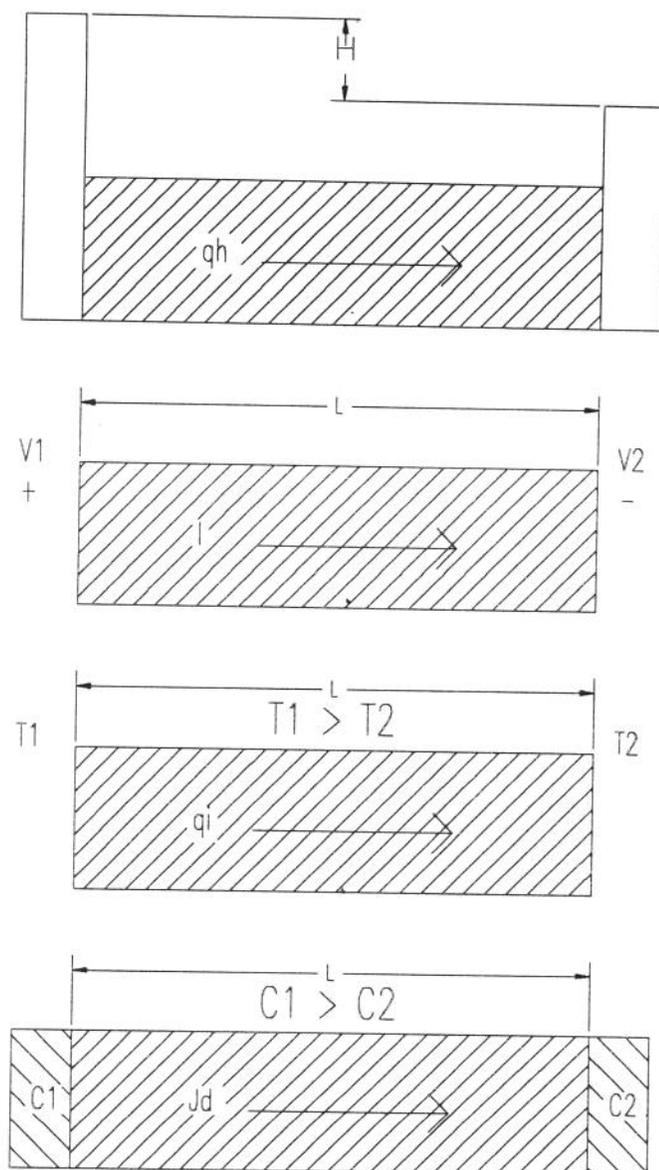


Figura 2.1 - Escoamentos diretos

### 2.1.2 Escoamentos acoplados

Além dos diretos, nos meios porosos podem ocorrer escoamentos acoplados. Um escoamento acoplado é um escoamento de um tipo, tal como hidráulico, por exemplo, causado por um gradiente de outro tipo, como por exemplo, elétrico.

A Tabela 2.1 apresenta os tipos de escoamentos acoplados que podem ocorrer, segundo esse conceito, e sua denominação usual.

TABELA 2.1. Escoamentos acoplados.

FLUXO J	GRADIENTE X			
	coluna hidráulica	temperatura	elétrico	concentração química
fluido	condução hidráulica: Lei de Darcy	termo-osmose	eletro-osmose	osmose química
calor	transferência isotérmica de calor	condução térmica: Lei de Fourier	efeito Peltier	efeito Dufour
elétrons	potencial de corrente	termo- eletricidade: Efeito Thompson	condução elétrica: Lei de Ohm	potenciais de difusão e membrana
partículas carregadas	potencial de corrente	difusão térmica de eletrólitos: Efeito Soret	eletroforese	difusão: Lei de Fick

O fenômeno do escoamento acoplado pode ser genericamente expresso como:

$$J_i = L_{ij} \cdot X_j \quad (2.6)$$

onde os termos  $L_{ij}$  são chamados coeficientes de acoplamento e são propriedades características de cada escoamento, dependendo dos tipos de materiais envolvidos. O primeiro subscrito indica o tipo de escoamento e o segundo, o tipo de força motriz.

Para exemplificar, se ocorre um escoamento de um fluido em um meio poroso sob a ação combinada de gradientes hidráulico, térmico, elétrico e químico, a Equação (2.6) torna-se:

$$J_H = L_{HH} \cdot X_H + L_{HT} \cdot X_T + L_{HE} \cdot X_E + L_{HC} \cdot X_C \quad (2.7)$$

onde  $L_{HH}$  é o coeficiente para o escoamento hidráulico sob gradiente hidráulico,  $L_{HT}$  é o coeficiente para o escoamento hidráulico sob gradiente térmico,  $L_{HE}$  é o coeficiente para o escoamento hidráulico sob gradiente elétrico e  $L_{HC}$  é o coeficiente para o escoamento hidráulico sob gradiente químico. Relações similares podem ser escritas para os outros tipos de escoamento.

## 2.2 Efeitos elétricos

Entre os efeitos decorrentes da aplicação ou indução de campo elétrico, abordados na literatura, são destacados os efeitos electrocinéticos, os efeitos electrohidrodinâmicos, os efeitos electroquímicos, e os efeitos de aquecimento.

Efeitos electrocinéticos são aqueles que envolvem campos elétricos e deslocamento de fases. Compreendem quatro fenômenos : electro-osmose, electroforese, potencial de corrente, e potencial de sedimentação, como mostra a Figura 2.2 .

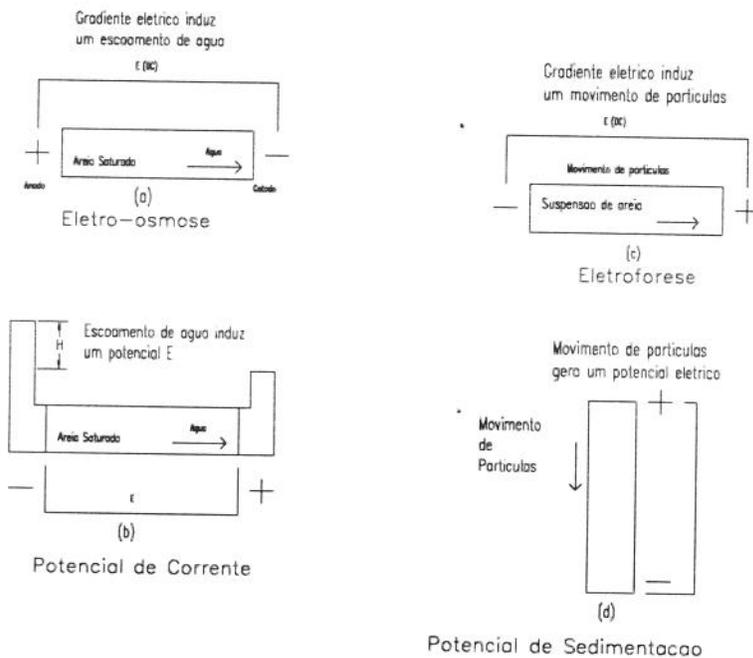


Figura 2.2 - Fenômenos electrocinéticos

Eleto-osmose refere-se ao movimento de um eletrólito através de um meio poroso devido a uma diferença de potencial elétrico aplicada através do meio contendo o eletrólito. Eletoforese corresponde à migração de partículas de uma solução coloidal sob a influência de um campo elétrico. Potencial de corrente é um fenômeno inverso à eleto-osmose e potencial de membrana é o fenômeno inverso à eletroforese.

Efeitos eletro-hidrodinâmicos são aqueles devidos às diferenças existentes entre as propriedades elétricas da amostra e do fluido vizinho. Distorções locais das linhas de corrente de um fluido envolvido por outro, sob a aplicação de um campo elétrico, resultam em uma heterogeneidade de tensões agindo na superfície deste fluido (deformação eletro-hidrodinâmica).

As mudanças químicas ocorrendo no sistema água/óleo/rocha, devido a aplicação de campo, são atribuídas aos efeitos eletroquímicos.

### 2.3 A dupla camada elétrica

Em qualquer interface entre duas fases postas em contato, ocorre uma segregação de cargas positivas e negativas na direção normal à fronteira das fases, estabelecendo assim uma diferença de potencial entre elas. Convém apresentar a considerável ordem de grandeza do campo elétrico gerado na dupla camada de interface. Tomando o valor aproximado da diferença de potencial através da dupla camada como sendo 1 volt, e um valor aproximado da distância entre as camadas de cargas da dupla camada como sendo de cerca de 0,3 nm, encontra-se a força do campo elétrico gerado:

$$\begin{aligned} 1/(0.3 \times 10^{-9}) &\cong 3 \times 10^9 \text{ v/m} \\ &\cong 30 \times 10^6 \text{ v/cm} \end{aligned}$$

O modelo de dupla camada elétrica que atualmente é considerado como o que melhor concorda com as observações experimentais foi desenvolvido por estágios, descritos a seguir.

### 2.3.1 Modelo de Helmholtz - Perrin

Historicamente, o primeiro modelo foi o de Helmholtz e Perrin (Figura 2.3). Esse modelo mostra a dupla camada simplesmente como uma camada plana de cargas (íons adsorvidos) na solução, neutralizando uma camada plana de cargas de sinal oposto em excesso na superfície sólida. Esse conceito de duas camadas de cargas opostas é a origem do termo "dupla camada elétrica" e, embora a situação seja indubitavelmente mais complexa, o nome original permanece sendo usado.

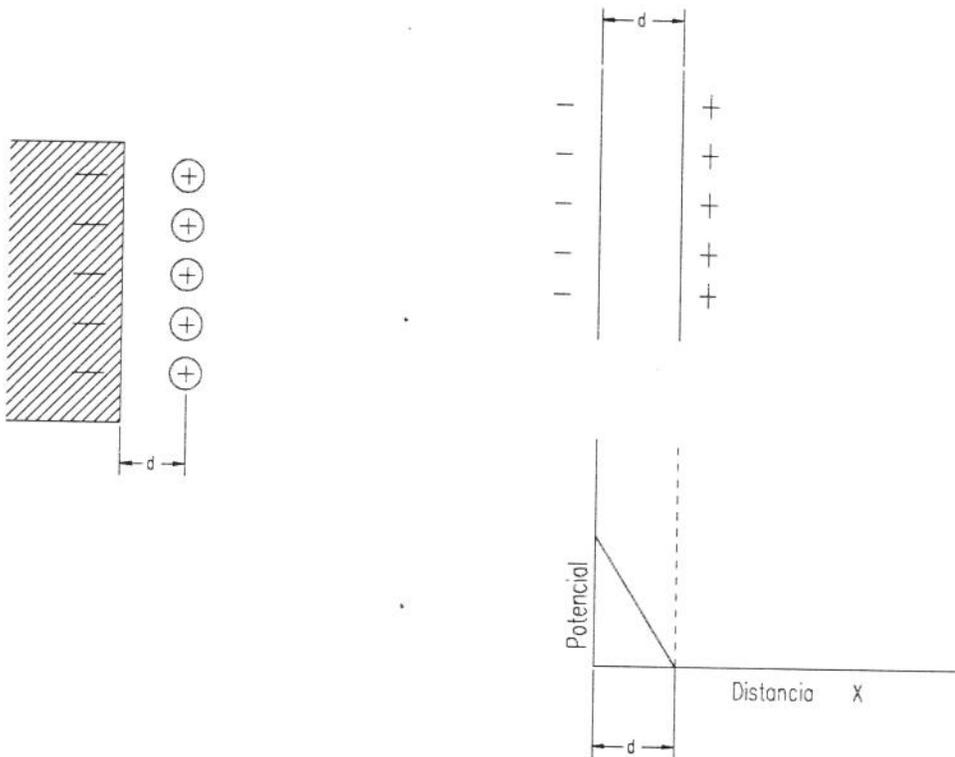


Figura 2.3 - Modelo de Helmholtz - Perrin para a dupla camada elétrica

O modelo de Helmholtz é demasiadamente simplificado, pois uma distribuição rígida de íons em um único plano não parece provável. Deve ocorrer agitação térmica de íons no lado da solução e eles certamente não estarão confinados a uma única folha de cerca de 0,5 nm distante da superfície sólida, mas distribuídos por uma distância muito maior no seio da solução. De acordo com esse modelo a dupla camada seria equivalente a um capacitor de placas paralelas na qual o potencial varia linearmente com a distância  $x$ :

$$\Psi = \Psi_0 (1 - (x/\delta)) \quad (2.8)$$

onde  $\Psi_0$  é o potencial na superfície sólida.

### 2.3.2 Modelo de Gouy - Chapman:

A idéia da distribuição de cargas na solução foi o ponto principal para outra teoria, a teoria da camada difusa de Gouy-Chapman. (Figura 2.4).

Por esse modelo, a densidade de carga difusa é espalhada na solução sob a influência de forças térmicas e elétricas. A dupla camada elétrica equivale a um capacitor de placas paralelas com distância entre as placas igual a  $k^{-1}$ . O potencial varia exponencialmente com a distância<sup>1</sup>:

$$\Psi = \Psi_0 \exp(-kx) \quad (2.9)$$

A teoria de Gouy-Chapman produz uma super-estimativa, com ênfase demais na distribuição e pouca ênfase na adesão dos íons à superfície sólida, no lado da solução.

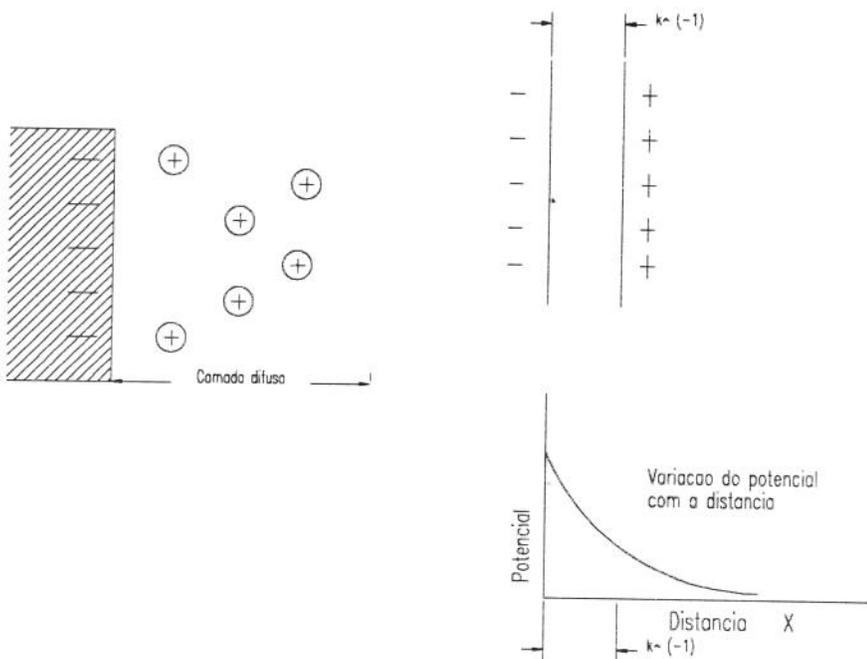


Figura 2.4 - Modelo de Gouy - Chapman para a dupla camada elétrica

<sup>1</sup> A região afetada por forças elétricas em interfaces depende da concentração dos íons na solução com a qual a superfície sólida está em contato. Ela será no mínimo 0,5 nm, podendo-se tornar-se muito maior, tal qual 100 nm, quando a concentração é muito baixa. Considerando uma solução de eletrólitos univalentes, a espessura da região afetada pelas forças elétricas é dada por:  $k^{-1} = 1 / B\sqrt{C}$ , sendo o valor de B dependente da temperatura e da permissividade do eletrólito. Para  $C = 10^{-4} \text{ mol/dm}^3$  e  $T = 298 \text{ K}$ , esta fórmula fornece  $k^{-1} = 30 \text{ nm}$ .

### 2.3.3 Modelo de Stern

Um terceiro modelo para a situação na dupla camada, melhor que os anteriores é o de Stern, no qual foram combinadas as idéias de Helmholtz e Gouy-Chapman.

De acordo com Stern, algumas das cargas da solução localizam-se em um plano chamado de "plano de maior aproximação" e as cargas remanescentes estão espalhadas pela solução. O "plano de maior aproximação" divide o lado da solução em duas regiões: a região de Helmholtz-Perrin e a região de Gouy-Chapman; cada uma dessas duas regiões pode ser simulada por um capacitor de placas paralelas (Figura 2.5) e portanto a dupla camada é equivalente a dois capacitores em série. A variação do potencial com a distância é linear na primeira região e exponencial na segunda região.

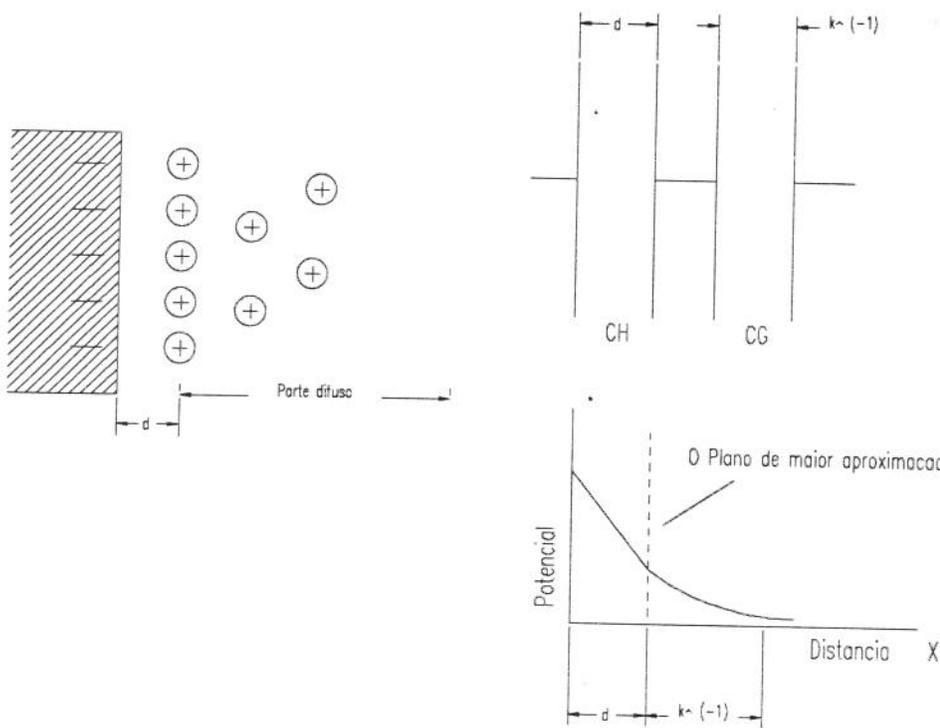


Figura 2.5 - Modelo de Stern para a dupla camada elétrica

A capacitância total da dupla camada é portanto dada por:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_H} + \frac{1}{C_G} \quad (2.10)$$

Fazendo  $\Psi_{x=0}$  ser o potencial da superfície relativamente a da solução e considerando o caso em que  $\Psi_0$  (o potencial do plano de Helmholtz) é suficientemente pequeno, então a variação do potencial pode ser descrita por:

$$\Psi = \Psi_{(x=0)} \frac{x}{\delta}, \text{ para } x < \delta \quad (2.11)$$

$$\Psi = \Psi_0 \exp [-k (x-\delta)], \text{ para } x > \delta \quad (2.12)$$

### 2.3.4 Modelo de Bockris, Devanathan e Muller:

O fato de que as moléculas de água em contato com a superfície sólida não apresentarão mais a mesma estrutura que a água no seio da solução, mas estarão orientadas como dipolos (assim contribuindo para a geração da diferença de potencial), foi desprezado até a década de 60. Um esquema que leva em consideração esse fato está mostrado na Figura 2.6, segundo Bockris, Devanathan & Muller.

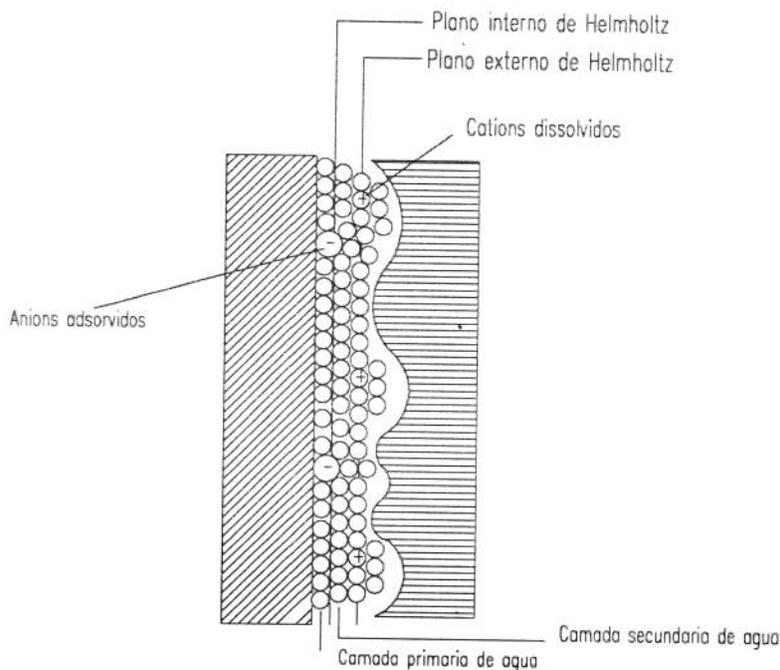


Figura 2.6 - Modelo de Bockris, Devanathan e Muller para a dupla camada elétrica

Observa-se que há uma distinção entre os íons adsorvidos em contato com a superfície e os cátions solvatados que são adsorvidos, porém sem contato direto com a superfície sólida.

O plano que passa pelo centro dos ânions adsorvidos por contato é denominado "plano interno de Helmholtz" e o que passa através dos centros dos íons solvatados, "plano externo de Helmholtz". De fato, existem dois planos externos de Helmholtz, um para os cátions e outro para os ânions, mas, em uma primeira aproximação, esses planos podem ser assumidos como idênticos.

Logo, podem ser distinguidas três regiões na estrutura do lado da solução, em uma interface eletrificada. A camada de água na primeira região está sob o efeito do campo da superfície, com as moléculas de água totalmente orientadas, sendo então, a permissividade dessa "camada de água primária" muito menor do que a permissividade da água na parte mais afastada, cujas moléculas estão parcialmente orientadas por efeitos térmicos e de pontes de hidrogênio.

Embora esse modelo seja mais refinado pode-se considerar, em aplicações práticas, os cálculos na maneira Helmholtziana mais simples.

## 2.4 A eletro-osmose

O escoamento hidráulico que ocorre devido à aplicação de um gradiente de potencial elétrico através de um meio poroso saturado com uma solução eletrolítica resulta do movimento de cátions em direção ao polo negativo, ou catodo. Isto porque, nos capilares, ocorre um excesso de cátions para neutralizar as cargas negativas das superfícies sólidas (grãos dos solos e reservatórios de petróleo, por exemplo).

Ao migrarem para o catodo, esses cátions conduzem moléculas de água, por arraste viscoso, causando o escoamento hidráulico.

Os ânions também arrastam água com eles, porém em proporção muito menor do que o fluxo para o catodo; logo, o escoamento resultante nesse sentido é maior.

Na engenharia geotécnica, a eletro-osmose é o efeito electrocinético de maior importância, devido à possibilidade de sua aplicação prática no transporte de água subterrânea, sendo uma das suas aplicações características a secagem e consolidação de solos para obras de engenharia civil.

Como exemplos pioneiros dessa aplicação, CHILINGAR (1970) cita obras de construção pesada na Alemanha, Inglaterra, Rússia e Canadá.

CASAGRANDE (1941) documentou um exemplo na secagem de solo em Salzgitter, Alemanha, durante a construção de uma ferrovia, na qual através de poços-eletrodos com 7,5 metros de profundidade e espaçados em 10 metros, passaram a ser retirados  $60\text{m}^3/\text{dia}$  por 20 poços após a aplicação de potencial elétrico de 180 volts e corrente de 19 ampéres/poços; essa vazão correspondeu a 150 vezes a vazão de água original dos poços.

FETZER (1967) relata ainda uma aplicação da secagem eletro-osmótica durante a construção da represa de West Branch, em Ohio, Estados Unidos da América. As instalações de campo desse projeto estão mostradas na Figura 2.7.

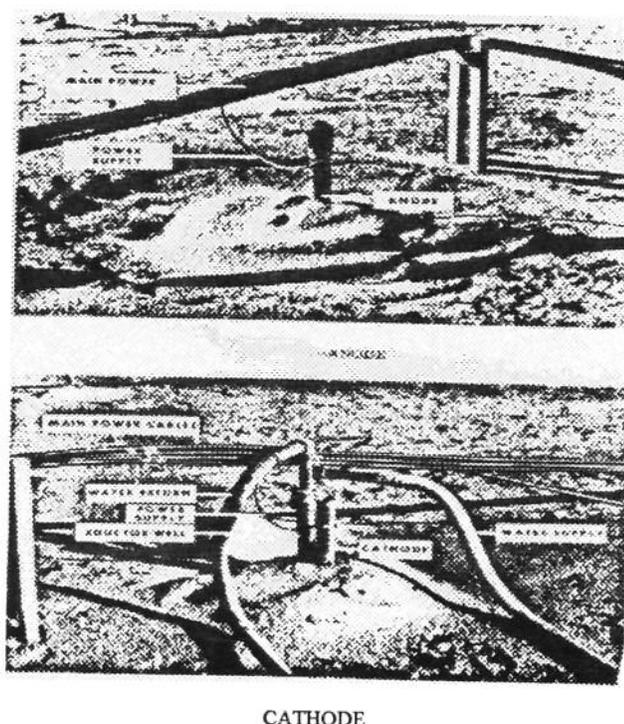


Figura 2.7 - Instalações de campo do projeto de secagem eletro-osmótica na construção da represa de North West Branch, Ohio, EUA.

Um exemplo mais recente é a proposta de utilização da eletro-osmose como meio para consolidação do solo sob a torre inclinada de Pisa, na Itália, cuja inclinação já atinge 5,50, tendo sido interdita a visitação pública desde o início de 1990. Uma comissão governamental italiana foi criada para recomendações para sua estabilização. A Figura 2.8 mostra um croquis desse projeto.

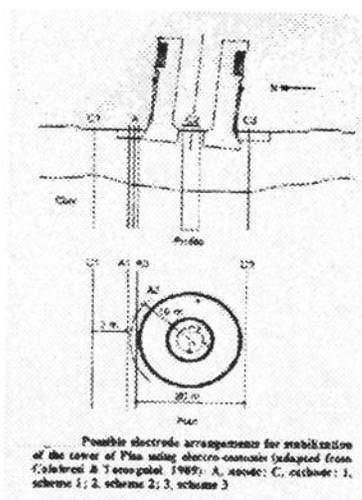


Figura 2.8 - Projeto para estabilização da Torre de Pisa, Itália, por eletro-osmose

### 2.4.1 Quantificação da eletro-osmose para fluxo monofásico

Sendo a eletro-osmose um escoamento acoplado, pode ser descrita pela Equação 2.6:

$$J_i = L_{ij} \cdot X_j$$

Em um caso geral, pode haver escoamentos hidráulico, químico, elétrico e térmico. Os fluxos químicos podem ser subdivididos de acordo com espécies particulares presentes. Conforme discutido anteriormente no item 2.1.2, cada tipo de fluxo pode apresentar contribuições causadas por gradientes de outro tipo, com sua importância relativa dependendo dos valores de  $L_{ij}$  e  $X_j$  na Equação 2.6; logo, a descrição completa e precisa de todos os fluxos é uma tarefa extremamente complexa.

Entretanto, em muitos casos, podem ser de interesse apenas fluxos de um ou dois tipos, alguns gradientes podem não existir, e/ou alguns dos coeficientes de acoplamento podem ser conhecidos ou ter pouca importância. A

matriz de fluxos e forças fica então significativamente reduzida e a determinação dos coeficientes fica bastante simplificada. Por exemplo :

$$q_w = L_{HH} \nabla (-P/\gamma) + L_{HE} \nabla (-E) + L_{HC} \nabla (-C) \quad (2.13.a)$$

$$I = L_{EH} \nabla (-P/\gamma) + L_{EE} \nabla (-E) + L_{EC} \nabla (-C) \quad (2.13.b)$$

$$J_c = L_{CH} \nabla (-P/\gamma) + L_{CE} \nabla (-E) + L_{CC} \nabla (-C) \quad (2.13.c)$$

Se não existe diferença de concentração química através do sistema, então os últimos termos do lado direito das Equações 2.13 desaparecem.

Se apenas os escoamentos hidráulico e elétrico interessam, muito embora possa ainda haver um fluxo químico de acordo com a Equação 2.13.c, as Equações 2.13.a e 2.13.b podem ser escritas como:

$$q_h = L_{HH} (\Delta P / \gamma) + L_{HE} \Delta E \quad (2.14.a)$$

$$I = L_{EH} (\Delta P / \gamma) + L_{EE} \Delta E \quad (2.14.b)$$

Na medição da condutividade hidráulica, não há fluxo de corrente elétrica, logo  $I = 0$  e  $\Delta E$  é o potencial de corrente; a Equação 2.14.b torna-se então:

$$\frac{\Delta E}{\Delta P} \gamma = - \frac{L_{EH}}{L_{EE}} \quad (2.15)$$

Na eletro-osmose,  $\Delta P = 0$  logo a Equação 2.14.a é igual a  $q_h = L_{HE} \Delta E$  e a Equação 2.14.b torna-se  $I = L_{EE} \Delta E$ , e então:

$$\frac{q_h}{I} = \frac{L_{HE}}{L_{EE}} \quad (2.16)$$

Pelo teorema da reciprocidade de ONSAGER (1931),  $L_{ij} = L_{ji}$ , o que conduz a:  $L_{EH} = L_{HE}$

Logo:

$$\left( \frac{q_h}{I} \right)_{\Delta P=0} = - \left( \frac{\Delta E}{\Delta P} \gamma \right)_{I=0} \quad (2.17)$$

Essa equivalência entre potencial de corrente e eletro-osmose foi constatada experimentalmente por SAXEN (1982), sendo conhecida como "lei de Saxen". Em seguida, foi verificada para vários sistemas argila-água-eletrólitos por OLSEN (1961) e GRAY (1966), entre outros.

Na condição de ausência de gradientes hidráulico, químico ou térmico, o fenômeno pode ser representado como:

$$J_H = L_{HE} X E \quad (2.18)$$

Na prática, essa relação é usualmente apresentada como:

$$q = vA = k_e \frac{\Delta E}{L} A \quad (2.19)$$

O coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica  $K_e$ , é, então, uma propriedade dos meios porosos que indica a velocidade de escoamento hidráulico sob um gradiente elétrico unitário, de modo análogo à condutividade hidráulica<sup>2</sup>, que é a velocidade de escoamento hidráulico sob um gradiente hidráulico unitário, expressa pela lei de Darcy (1856):

$$v_h = k_h \left( \frac{\Delta P / \gamma}{L} \right) \text{ ou} \quad (2.20)$$

$$q_h = k_h \cdot \left( \frac{\Delta P / \gamma}{L} \right) \cdot A \quad (2.21)$$

A medição de  $k_e$  pode ser feita pela determinação da vazão da água através de uma amostra de meio poroso de comprimento e área de seção transversal conhecidas, sob a ação de um gradiente elétrico conhecido e gradiente hidráulico nulo.

Segundo MITCHELL (1976), os valores encontrados para  $K_e$  situam-se geralmente na faixa de  $1 \times 10^{-5}$  a  $10 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{V.s.}$

---

<sup>2</sup> A permeabilidade comumente usada na área da engenharia de petróleo, que possui dimensão de área e é usualmente expressa nas unidades Darcy (D), deriva da equação de Poiseuille para permeabilidade em meios porosos e é igual ao produto da condutividade hidráulica, da viscosidade do fluido, e do inverso da sua massa específica. (vide Anexo A)

## 2.4.2 Teorias para a eletro-osmose

Diversas teorias foram desenvolvidas para explicar a eletro-osmose e fornecer base para a previsão quantitativa de vazões volumétricas.

### 2.4.2.1 Teoria de Helmholtz - Smoluchowski:

Uma das primeiras e ainda largamente utilizadas descrições teóricas do fenômeno eletrocinético é baseada em um modelo introduzido por Helmholtz (1879), para um único tubo capilar e refinado por Smoluchowsky (1914), para um meio poroso constituído de capilares de formatos aleatórios.

Um tubo capilar preenchido por um líquido é tratado como um condensador elétrico com cargas de um determinado sinal sobre ou próximas à superfície da parede e, no meio líquido cargas contrárias (contra-íons) concentradas em uma camada situada a pequena distância  $\delta$  da parede (Figura 2.9).

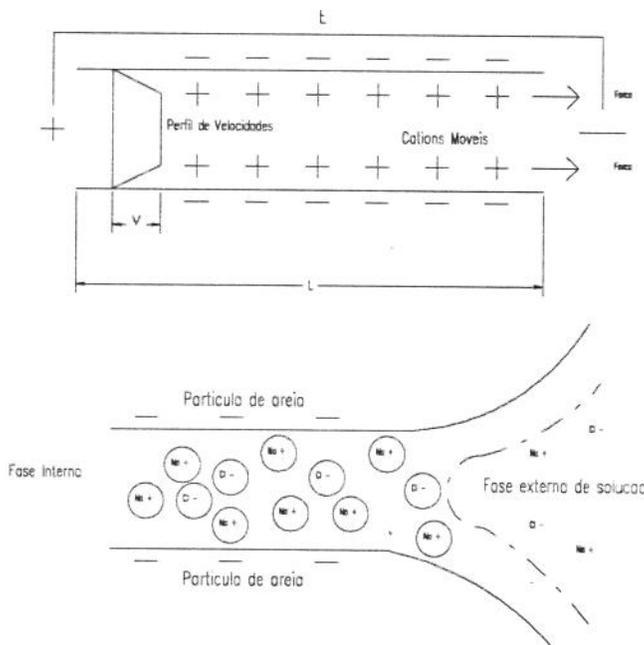


Figura 2.9 - Teoria de Helmholtz - Smoluchowsky para a eletro-osmose

Submetidos a um potencial elétrico, os contra-íons arrastam água através do capilar ocasionando um alto gradiente de velocidade entre os dois planos do condensador.

A vazão de escoamento de água é controlada pelo balanço entre as forças elétricas que causam movimento e a força de atrito entre o líquido e a parede.

O gradiente de velocidade entre a parede e o centro das cargas positivas é  $v/\delta$ ; logo, a força de arraste é:

$$\mu \frac{dv}{dx} A = \mu \frac{v}{\delta} A \quad (2.22)$$

A força proveniente do campo elétrico é  $\sigma \Delta E/L$  onde  $\sigma$  é a densidade de cargas superficiais.

No equilíbrio:

$$\mu \frac{v}{\delta} A = \sigma \frac{\Delta E}{L} A \quad (2.23)$$

ou 
$$\sigma \delta = \mu \frac{v}{\Delta E} L \quad (2.24)$$

Da teoria da eletrostática, o potencial  $\xi$  através de um condensador, é dado por:

$$\xi = \frac{4\pi\sigma\delta}{D} \quad (2.25)$$

Substituindo o valor de  $(\sigma \cdot \delta)$  da Equação 2.24 na Equação 2.25, encontra-se:

$$v = \left(\frac{\xi D}{4\pi\mu}\right) \frac{\Delta E}{L} \quad (2.26)$$

O potencial  $\xi$  é usualmente denominado "potencial Zeta" em sistemas coloidais, apresentando valores típicos na faixa de 0 a -50 mV para argilas. O potencial Zeta é definido como o trabalho necessário para mover uma carga positiva da fase líquida para a camada rígida fortemente adsorvida, na dupla camada elétrica.

Para um único capilar de área  $a$ , a vazão volumétrica é, então:

$$q_a = v a = \frac{\xi D}{4\pi\mu} \frac{\Delta E}{L} a \quad (2.27)$$

e, para um feixe de  $N$  capilares com área total transversal à direção do fluxo  $A$ ,

$$q_A = \frac{\xi D \Delta E}{4\pi\mu L} N a \quad (2.28)$$

Para um meio poroso de porosidade  $\phi$ , a área transversal de vazios é  $\phi \cdot A$ . Como  $A = N a$ , então :

$$q_A = \frac{\xi D}{4\pi\mu} \phi \frac{\Delta E}{L} A \quad (2.29)$$

Por analogia com a Equação 2.29,

$$k_e = \frac{\xi D}{4\pi\mu} \cdot \phi \quad (2.30)$$

Uma forma mais conveniente dessa equação resulta pela utilização do fator de formação,  $F$ , que é a razão entre a condutividade da solução eletrolítica e a condutividade do meio poroso saturado com a solução eletrolítica:

$$q_A = \frac{AD\xi\Delta E}{4\pi\mu FL} \quad (2.31)$$

como  $q_A = A k_e \Delta E/L$  , Equação 2.19 ,

então:

$$k_e = \frac{D\xi}{4\pi\mu F} \quad (2.32)$$

Deve ser observado que de acordo com a teoria de Helmholtz - Smoluchowski,  $k_e$  independe dos tamanhos dos poros. O mesmo não ocorre com a condutividade hidráulica,  $k_h$ , que varia com o quadrado de uma dimensão efetiva (vide Anexo A).

Dai, a importância relativamente maior do fenômeno eletro-osmótico em meios porosos de granulometria fina.

A título de ilustração, considere-se uma areia fina e uma argila, com valores de condutividade hidráulica ( $k_h$ ) de  $1 \times 10^{-3}$  cm/s e  $1 \times 10^{-8}$  cm/s, respectivamente. Para ambas o coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica ( $k_e$ ) é  $5 \times 10^{-5}$  cm<sup>2</sup>/V.s. Para vazões iguais:

$$k_h \left( \frac{P/\gamma}{L} \right) = k_e \left( \frac{\Delta E}{L} \right) \quad (2.33)$$

ou

$$\left( \frac{\Delta P/\gamma}{L} \right) = \frac{k_e}{k_h} \left( \frac{\Delta E}{L} \right) \quad (2.34)$$

Se for utilizado um gradiente de potencial elétrico de 0,2 V/cm, então, para a areia fina:

$$\left( \frac{\Delta P/\gamma}{L} \right) = \frac{5 \times 10^{-5}}{1 \times 10^{-3}} \times 0,2 = 0,01$$

e para a argila:

$$\left( \frac{\Delta P/\gamma}{L} \right) = \frac{5 \times 10^{-5}}{1 \times 10^{-8}} \times 0,2 = 1000$$

Então para a areia um gradiente hidráulico de apenas 0.01 é capaz de mover água tão eficientemente quanto um gradiente elétrico de 0,2 V/cm; entretanto, para a argila, o gradiente hidráulico necessário para igualar o fluxo eletro-osmótico seria de 1000.

#### 2.4.2.2 Teoria de Schmid:

A teoria de Helmholtz-Smoluchowski, por sua hipótese de que a espessura da camada de contra-íons é desprezível dentro do poro, é essencialmente uma teoria adequada para tamanhos de poros grandes (diâmetros maiores que  $1000 \text{ \AA}$ ).

SCHMID (1950, 1951) propôs um modelo cinético que pode ser adequado a tamanho de poros pequenos ( $d < 1000 \text{ \AA}$ ). Considera-se que os contra-íons estão uniformemente distribuídos por todo o volume líquido.

A força elétrica age uniformemente sobre toda a seção transversal do poro, fornecendo o perfil de velocidades mostrado na Figura 2.10.

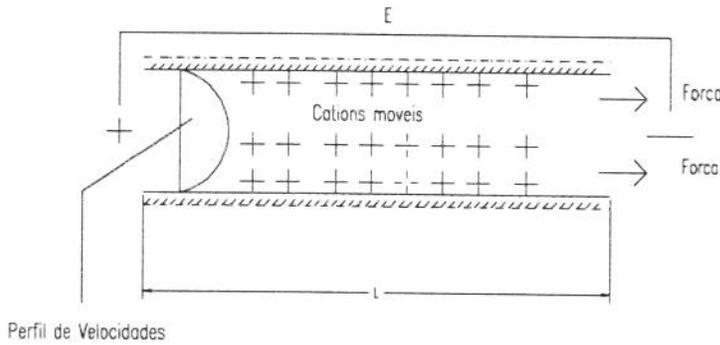


Figura 2.10 - Teoria de Schmid para a eletro - osmose

O ponto de partida desta teoria é a equação de Poiseuille para vazão em um único capilar de área de seção transversal  $a$ :

$$q = \frac{\pi r^4}{8\mu} \gamma \omega \left( \frac{\Delta P / \gamma}{L} \right) \quad (2.35)$$

A força hidráulica por unidade de comprimento que causa o escoamento pode ser isolada como:

$$F_H = \pi r^2 \cdot \gamma \omega \left( \frac{\Delta P / \gamma}{L} \right) \quad (2.36)$$

tal que:

$$q = \frac{r^2}{8\mu} (F_H) \quad (2.37)$$

A força elétrica por unidade de comprimento  $F_E$ , é igual à carga multiplicada pelo potencial, ou seja:

$$F_E = A_0 F_0 \pi r^2 \left( \frac{\Delta E}{L} \right) \quad (2.38)$$

Substituindo  $F_H$  por  $F_E$  na Equação 2.37, tem-se

$$q_a = \frac{\pi r^4}{8\mu} A_0 F_0 \left(\frac{\Delta E}{L}\right) = \frac{F_0 A_0 r^2}{8\mu} \left(\frac{\Delta E}{L}\right) a \quad (2.39)$$

e, para a seção transversal total de  $N$  capilares e área  $A$ :

$$q_A = \frac{F_0 A_0 r^2}{8\mu} \phi \cdot \left(\frac{\Delta E}{L}\right) \cdot A \quad (2.40)$$

A Equação 2.40 mostra que  $k_e$  deve variar com  $r^2$ , enquanto que a teoria de Helmholtz-Smoluchowski conduz a  $k_e$  independente dos tamanhos dos poros.

Entre as duas teorias, a primeira fornece melhores resultados para solos argilosos, provavelmente devido à estrutura de agregação que as argilas apresentam, determinando que o escoamento seja controlado pelos poros maiores.

### 2.4.2.3 Modelo de Fricção de Spiegler:

Um conceito completamente diferente para os processos electrocinéticos leva em consideração as interações entre os componentes móveis (água e íons) e as interações de atrito desses componentes com as paredes dos poros (SPIEGLER, 1958). Nenhuma estrutura particular é especificada para o meio poroso.

Nessas bases foi derivada a seguinte equação para o transporte electro-osmótico de água:

$$\Omega = (\omega - H) = \frac{C_3}{C_1 + C_3(X_{34} / X_{13})} \quad (2.41)$$

na qual  $\Omega$  é o fluxo electro-osmótico (em moles/Faraday),  $\omega$  é o transporte de água medido (em moles/Faraday),  $H$  é a hidratação dos íons (em moles/Faraday),  $C_3$  é a concentração de água livre (em moles/cm<sup>3</sup>),  $C_1$  é a concentração de contra-íons

móveis (em moles/cm<sup>3</sup>),  $X_{34}$  é o coeficiente de fricção entre a água e a parede sólida, e  $X_{13}$  é o coeficiente de fricção entre os cátions e a água.

As concentrações  $C_3$  e  $C_1$  são hipotéticas e provavelmente são menores que valores medidos por análises químicas, porque alguns íons podem ficar imóveis. A avaliação de  $X_{13}$  e  $X_{34}$  requer medição de coeficientes de difusão, condutância, números de transferência e transporte de água. Logo, a Equação (2.41) limita-se a uma equação de estimativa. Seu valor consiste em fornecer um quadro físico relativamente simples para um processo complexo.

#### 2.4.2.4 Teoria da Hidratação de íons:

De acordo com essa teoria, água de hidratação é transportada pelos íons em um campo de corrente contínua. O transporte de íons hidratados (H) é dado por:

$$H = (t_+ N_+) - (t_- N_-) \quad (2.42)$$

onde  $t_+$  e  $t_-$  são números de transporte, isto é, números que representam a fração de corrente transportada por uma espécie iônica particular.  $N_+$  e  $N_-$  são os números de moles de água de hidratação por mol de cátions e ânions, respectivamente.

Observa-se que quanto maior a diferença entre os números de transporte positivos e negativos, maior será o transporte de água.

## 2.5 Eletroquímica

Um sistema consistindo de dois eletrodos, uma fonte de potência, e uma solução eletrolítica comporta-se como uma célula eletroquímica. Em sistemas eletroquímicos, o transporte de massa pode ocorrer de três modos importantes, mostrados a seguir:

### a) Difusão

Difusão é o movimento de uma espécie na direção de um gradiente de concentração (para o mais baixo) e ocorre sempre que há uma transformação química em uma superfície. Uma reação de eletrodo converte matéria-prima em produto ( $M \Rightarrow P$ ), e portanto próximo à superfície do eletrodo existe sempre uma camada na qual as concentrações de M e P são uma função da distância a partir da superfície do eletrodo. A concentração de M é menor na superfície do que na solução, enquanto que o oposto ocorre para P, e portanto M irá difundir na direção do eletrodo e P, na direção contrária.

### b) Migração:

Migração é o movimento de espécies carregadas devido a um gradiente de potencial e é o mecanismo pelo qual cargas passam através do eletrólito: a corrente de elétrons passando através do circuito externo deve ser balanceada pela passagem de íons através da solução entre os eletrodos (cátions para o catodo e ânions para o anodo).

### c) Convecção:

Convecção é o movimento de uma espécie devido a forças mecânicas, como por exemplo vibração ou agitação.

Em uma célula eletroquímica como a mostrada na Figura 2.11 que apresenta a reação de eletrólise da água, a fonte de potência age como uma "bomba" de elétrons, enviando-os para o catodo e removendo-os do anodo<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> Por convenção, em uma célula eletroquímica, o catodo é considerado negativo e o anodo, positivo; o fluxo de corrente dá-se do anodo positivo para o catodo negativo.

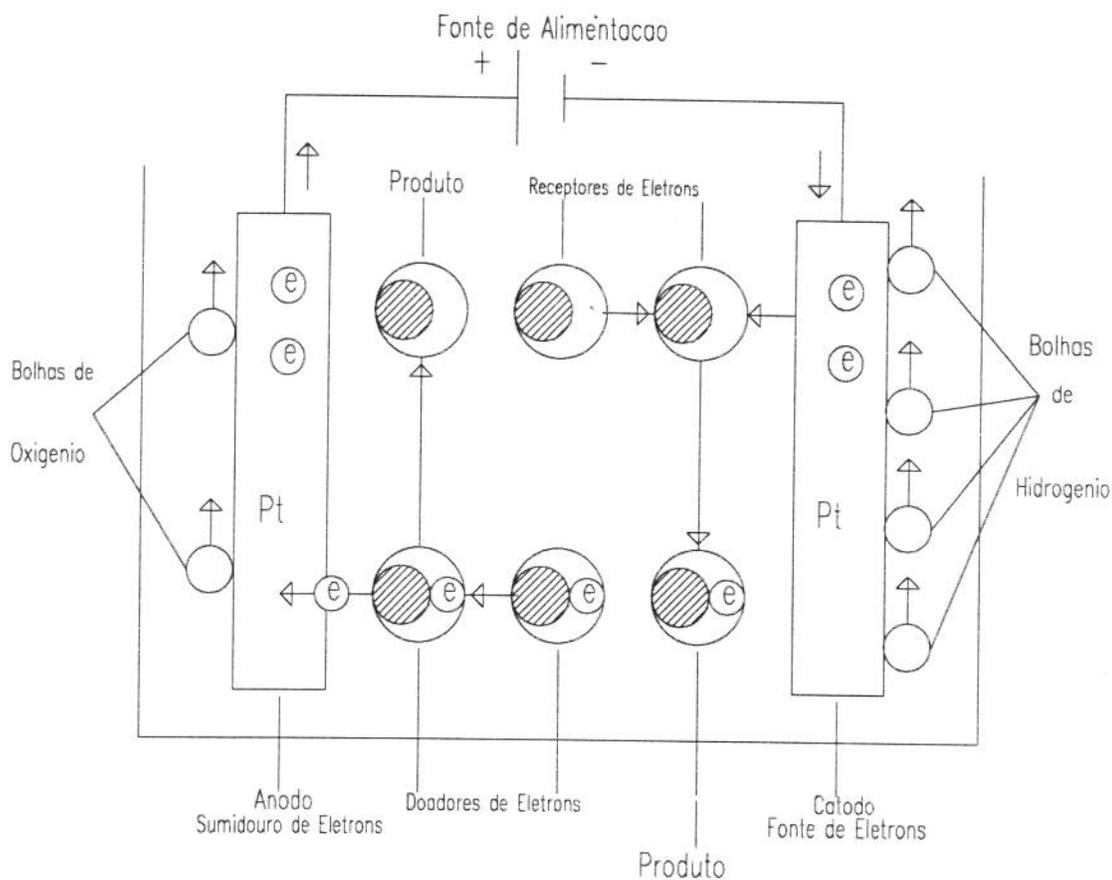
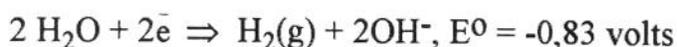


Figura 2.11 - Célula Eletroquímica , representando hidrólise da água

As reações de oxidação-redução que ocorrem preferencialmente nos eletrodos são aquelas que requerem a menor quantidade de energia.

Experimentos destinados a investigar o transporte de água mostraram que a principal reação catódica é a produção de hidrogênio gasoso e que no anodo, a água é oxidada, produzindo oxigênio:

- *Reação Catódica:*



- *Reação Anódica:*



### 3 METODOLOGIA

Com a finalidade de investigar a ocorrência da eletro-osmose e a alteração na estrutura das argilas devido ao tratamento eletroquímico, foi programada uma série de experimentos com meios porosos lineares nas seguintes variações:

**Meio Poroso**

*A - areia pura*

*B - areia com argila*

**Fluidos<sup>4</sup>**

*A - querosene*

*B - petróleo*

**Configuração**

*1. catodo na extremidade de produção e anodo na extremidade de injeção*

*2. anodo na extremidade de produção e catodo na extremidade de injeção.*

#### 3.1 Aparato experimental - Projeto e Montagem

Os materiais utilizados na construção do meio poroso tiveram como objetivo a obtenção de um meio homogêneo, livre de impurezas que pudessem mascarar os fenômenos de interesse. Entretanto, buscou-se ainda simular, na medida do possível as características médias do reservatório R1A da formação Sergi do campo de Dom João, situado no Recôncavo Baiano. Este campo, devido ao grande volume de suas reservas e à baixa recuperação obtida até o presente, tem sido alvo constante de estudos e projetos visando à otimização da sua exploração através do aumento de seu potencial de produção.

A utilização de querosene, antes dos testes com o óleo de Dom João, teve como objetivo o aprendizado do processo com um fluido menos complexo do que o petróleo cru, além da maior facilidade no manuseio, por ser

---

<sup>4</sup> Como solução aquosa foi programada a utilização da solução salina especificada no Anexo B.

menos viscoso do que o óleo de Dom João; além disso o óleo de Dom João apresenta um agravante: o seu ponto de névoa situa-se em torno de 37 °C, temperatura esta próxima à temperatura do reservatório em questão (38°C a 40°C).

A utilização de duas configurações distintas buscou investigar as vantagens de uma sobre a outra em escoamentos bifásicos sendo que a primeira vem sendo utilizada sistematicamente pelos pesquisadores, principalmente em escoamentos monofásicos.

A partir de 1992, baseado em uma patente de SACUTA (1980) AGGOUR e MUHAMMADAIN utilizaram somente a configuração 2 em seus experimentos laboratoriais aplicados ao escoamento bifásico de fluidos encontrados em reservatórios de petróleo da Arábia Saudita. Esses experimentos foram conduzidos com aplicação de uma diferença de potencial utilizando corrente contínua, nos quais o catodo estava localizado na extremidade de injeção de água e o anodo na extremidade de produção de óleo. Com esse arranjo, o fluxo eletro-osmótico ocorre no sentido contrário ao fluxo hidrodinâmico. Eles constataram um aumento na produção de óleo e redução na produção acumulada de água e na razão água-óleo de produção. A melhoria no desempenho da injeção de água só foi observada após a erupção de água, e aumentou com o aumento do gradiente de potencial.

O conjunto de equipamentos e o aparato experimental estão esquematizados na figura 3.1

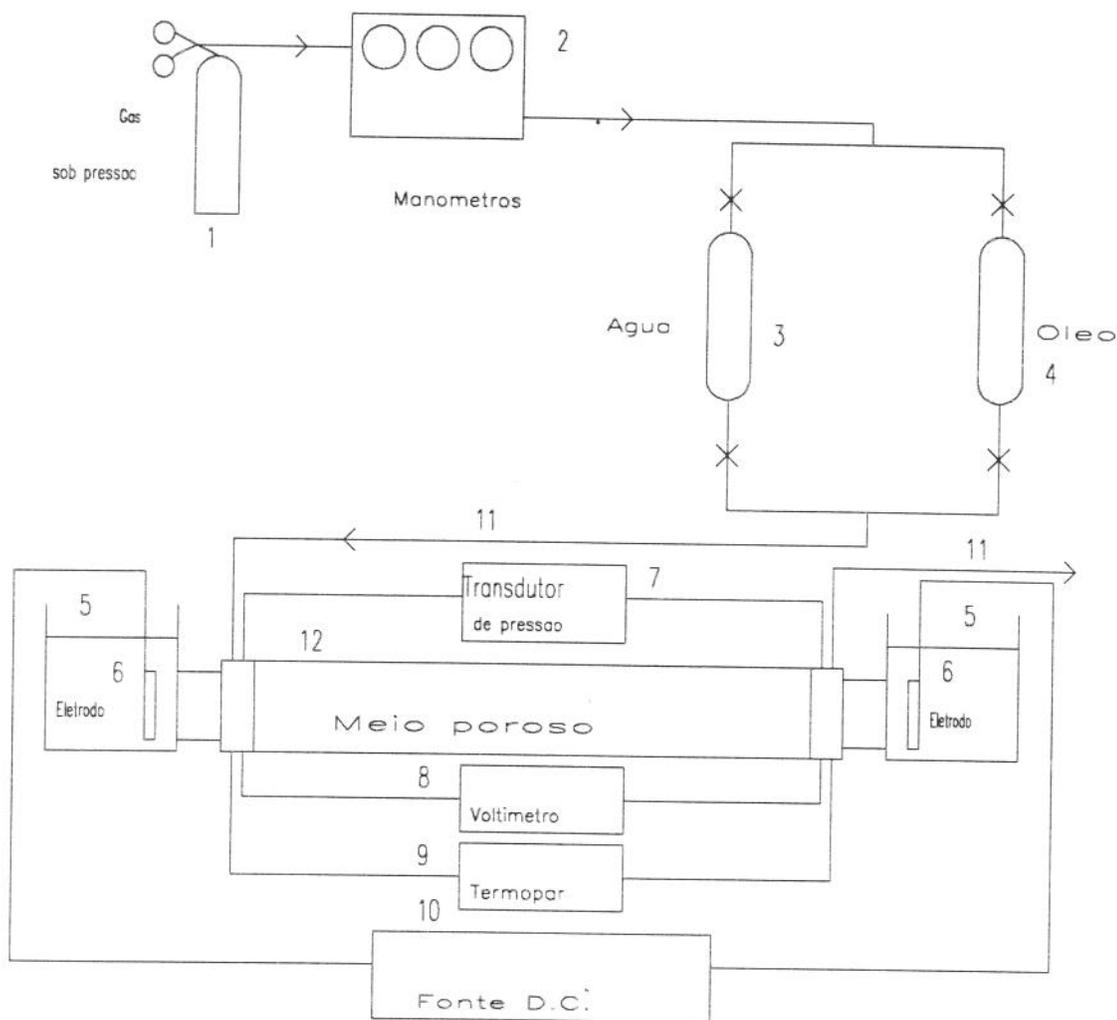


Figura 3.1 - Desenho esquemático do conjunto de equipamentos e aparato experimental.

Os equipamentos utilizados estão relacionados a seguir:

1. Cilindro de nitrogênio, utilizado inicialmente para realizar os testes de deslocamento por injeção de fluidos à pressão constante. Logo foi substituído por ar comprimido, devido ao seu mais baixo custo.
2. Painel com manômetros e válvulas reguladoras de pressão da Core Laboratories modelo 5120-062 (figura 3.2).

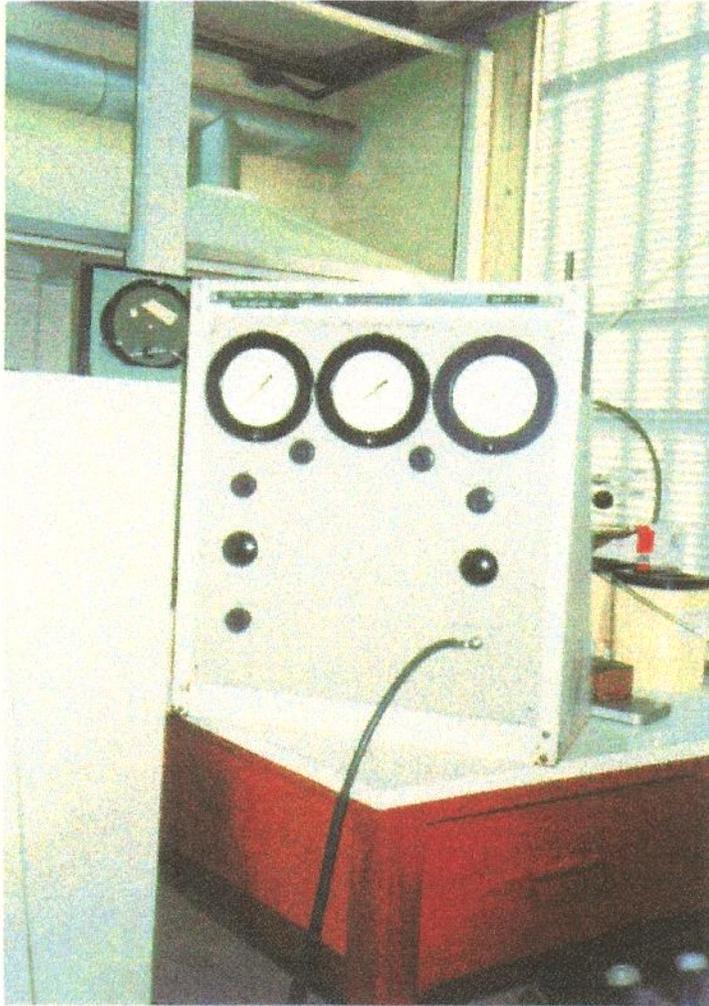


Figura 3.2 - Fotografia do painel de controle de pressão

3. e 4. Garrafas de acrílico e conexões de aço inox utilizadas como reservatórios dos fluidos injetados na amostra (solução salina e querosene ou petróleo).  
Altura  $\Rightarrow$  42,5 cm  
Diâmetro  $\Rightarrow$  5,9 cm
5. Caixas de acrílico que funcionaram como recipiente para a solução e os eletrodos da célula eletroquímica.
6. Eletrodos de platina, cortados em formato circular (diâmetro = 3,2 cm), com haste também em platina.
7. Conjunto transdutor e indicador de pressão tipo "strain gauge" da marca Validyne, modelo CD-23.
8. Voltímetro D.C., (0-500 volts), da marca Hartmann-Braun do Brasil, conectado aos eletrodos de medição de platina instalados nas extremidades

amostra. Para medição da corrente elétrica era usado também o Multímetro digital Minipa modelo ET - 2001

9. Indicador de temperatura COEL modelo URI-8 ao qual foram conectados os fios do termopar tipo J (ferro-constantan), por sua vez introduzidos nas extremidades da amostra.
10. Fonte de potência para alimentação de corrente contínua modelo SME 1963 da SME Eletrônica Ind. e Com. Ltda.
11. Linhas de injeção e produção de fluidos, de tubo "saran" com diâmetro externo de 1/8"
12. Corpo de prova, constituído de areia pura ou areia com 10% de folhelho, cuja construção está detalhada a seguir, no item 4.2.

### 3.2 Preparo das amostras

Foram preparadas doze amostras de meio poroso conforme descrito a seguir.

A areia utilizada para a construção do meio poroso foi coletada em margem de rio, tendo sido limpa e esterilizada através de lavagem ácida (com solução de ácido clorídrico a 10%), seguida de sucessivas lavagens com água destilada e, em seguida, seca em estufa.

A seleção dos tamanhos de grãos foi feita por passagem através de peneiras cobrindo a faixa de 35 a 140 mesh<sup>5</sup>, que representa a variação de granulometria encontrada nos reservatórios Sergi faciologicamente semelhantes à unidade R1A do campo de Dom João.

Os argilominerais presentes neste reservatório estão descritos por JOCHIMEK (1981, 1987) e RODRIGUES (1990). Entretanto, devido a dificuldade de obtenção de material, buscou-se outra alternativa para ser utilizada.

---

<sup>5</sup> Isto corresponde a diâmetros de grãos de 0,12 a 1,00 mm. (NETTO, 1980).

A fração de argila utilizada foi proveniente do folhelho de Ponta Grossa, da Bacia do Paraná, existente na cidade de Rio Verde no Mato Grosso do Sul, obtidas no Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. Amostras deste folhelho foram analisadas por difratometria de raios X nesse Instituto, tendo apresentado nos resultados picos de quartzo, caulinita, illita, clorita e/ou clorita-esmectita (COIMBRA, 1994).

Então, nos meios porosos sintéticos nos quais utilizou-se argila, foi misturada à areia 10% em peso desse folhelho, triturado em moinho de bolas Fritsch modelo "pulverizettes", no Instituto de Geociências da UNICAMP.

A areia ou a mistura de areia e argilas foi compactada por pressão mecânica dentro de uma mangueira de polietileno de 1 1/2" de diâmetro e comprimento em torno de 25 cm, tendo nas suas extremidades discos<sup>6</sup> de 5 mm de espessura de rocha consolidada (do arenito Rio Bonito, formação São Carlos, Paraná) cuja finalidade era de contenção do meio poroso inconsolidado. Ao lado de cada um dos discos de rocha foram ainda colocados anéis de acrílico de cerca de 10 mm de espessura, que formaram câmaras nas quais foram feitas as conexões das linhas de injeção ou produção de fluidos, linhas para o transdutor de pressão, fios do termopar e fios de platina que atuaram como eletrodos de medição da diferença de potencial através do meio poroso.

Esse procedimento não foi suficiente para obter a permeabilidade média do reservatório em estudo, de cerca de 300 mD. As amostras foram então submetidas a encapsulamento com resina epoxi marca Quinducot, da Química Industrial União Ltda e compactadas sob pressão de 700 psi, com nitrogênio, em cilindros de aço. Para isso as amostras foram colocadas em um recipiente cilíndrico de material flexível de folha de latão de 3 mm de espessura. No espaço anular era colocada a mistura dos dois componentes da resina, ainda líquida, e que, após a cura, mantinha o meio poroso compactado.

---

<sup>6</sup> Os cinco plugs utilizados para obtenção dos discos tiveram suas permeabilidades absolutas medidas tendo sido encontrados os seguintes valores:

SC - 1 — k = 157, mD

SC - 4 — k = 317 mD

SC - 2 — k = 222 mD

SC - 5 — k = 343 mD

SC - 3 — k = 245 mD

Para evitar o envergamento da amostra foram colados na parte externa da mangueira pequenos cubos de acrílico que funcionaram como centralizadores (Figura 3.3).

Foram ainda colocadas rolhas de borracha nas extremidades, com parafusos, para manter um lastro de resina no fundo do recipiente.

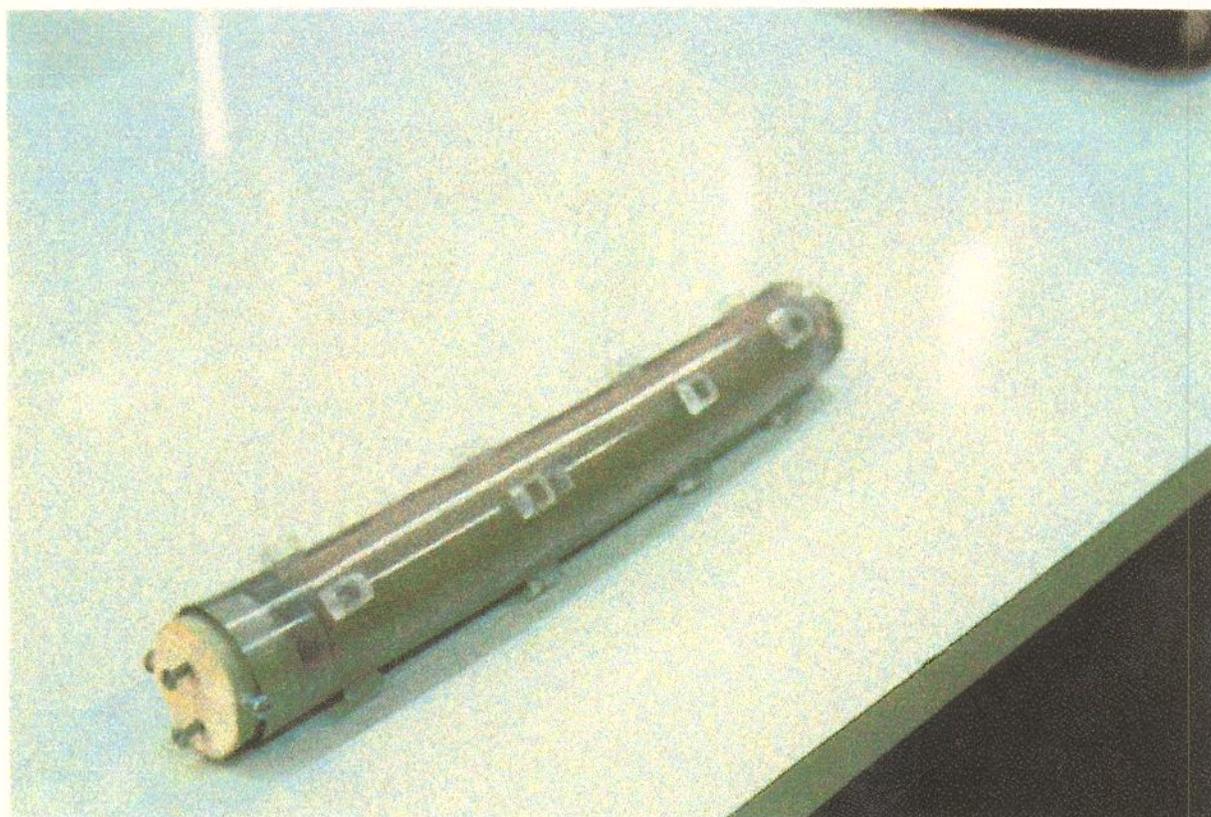


Figura 3.3 - Fotografia de uma amostra de meio poroso antes do encapsulamento com resina epoxi.

Após a compactação, as amostras tinham suas permeabilidades absolutas medidas no permeabilímetro a gás CORELAB, modelo 3020-124 (Figura 3.4).

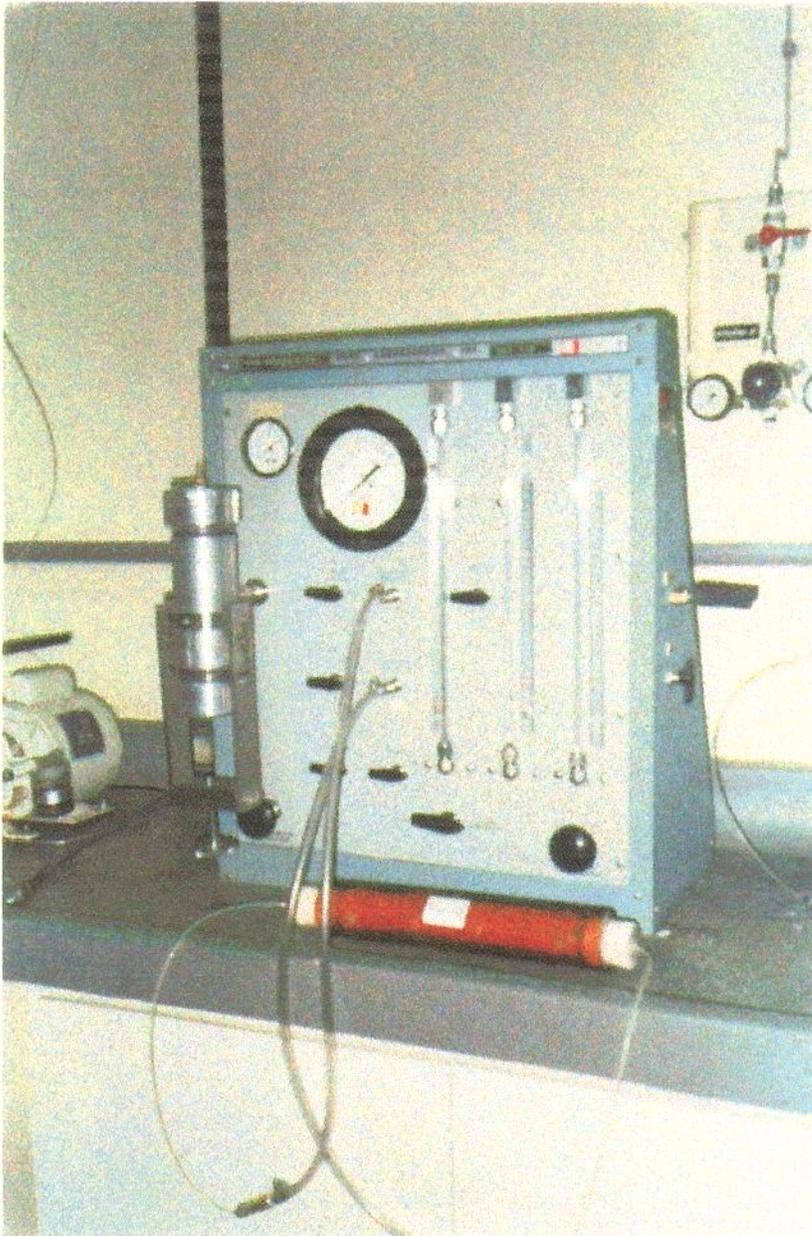


Figura 3.4 - Fotografia de uma amostra após encapsulamento com resina epoxi, tendo sua permeabilidade absoluta medida no permeabilímetro a gás.

Em seguida, suas extremidades eram faceadas em torno mecânico e estavam prontas para serem integradas ao sistema eletroquímico (Figura 3.5).

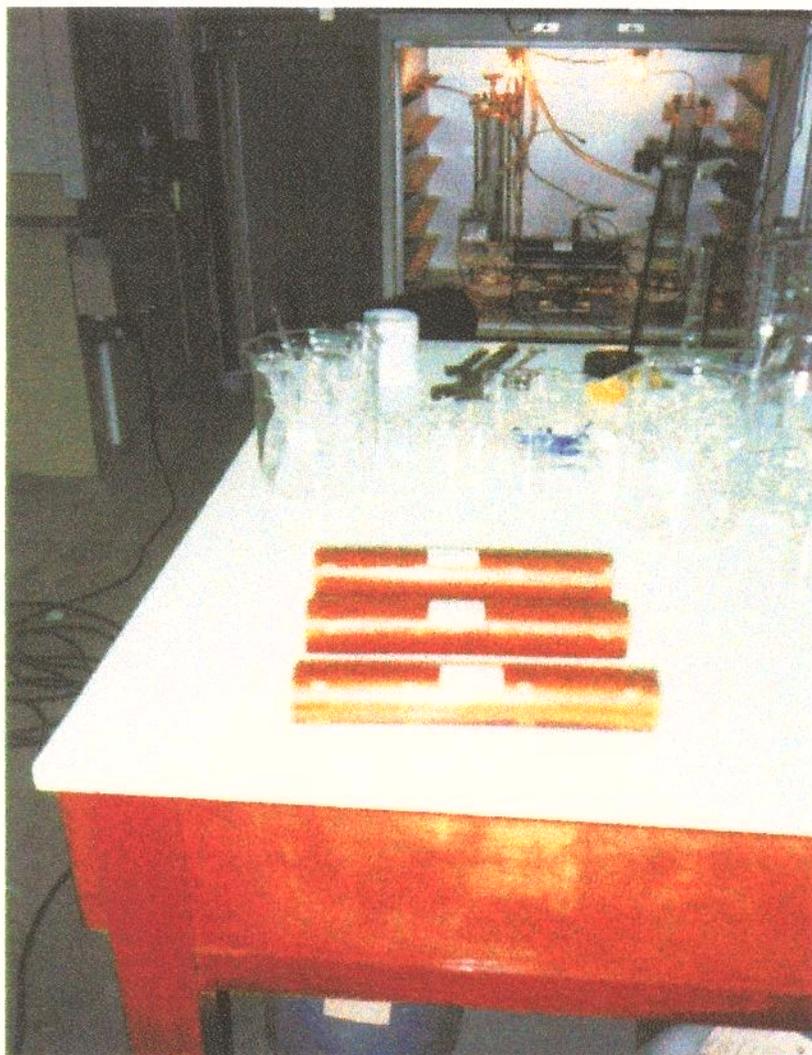


Figura 3.5 - Fotografia de amostras após encapsulamento com resina epoxi e medição de permeabilidade absoluta.

A figura 3.6 mostra esquematicamente maiores detalhes dos componentes do conjunto amostra-células.

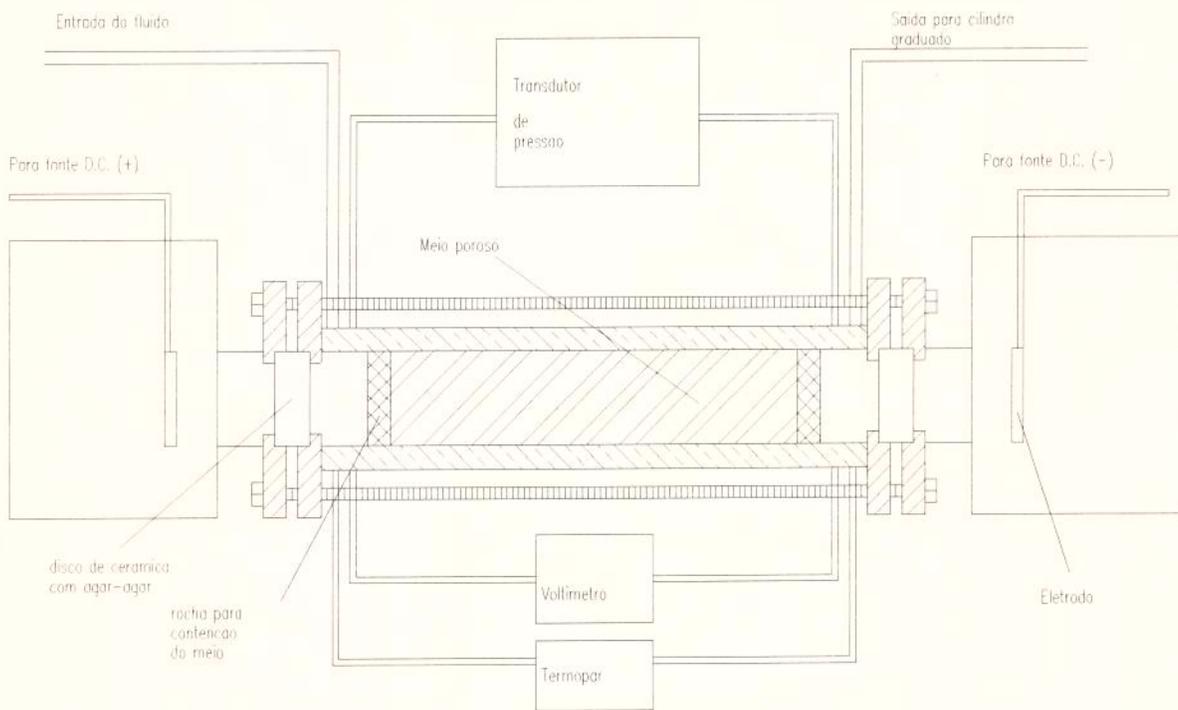


Figura 3.6 - Desenho esquemático dos componentes do conjunto amostra - células.

A conexão entre a amostra e as caixas de acrílico foi feita através de flanges de acrílico, confeccionadas no Departamento de Energia da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP. Essas flanges, mostradas na fotografia da figura 3.7, possuem um encaixe central para conter um disco poroso de cerâmica. Este disco de cerâmica foi saturado a vácuo com solução de agar-agar, que é um composto de algas vegetais, em solução concentrada de cloreto de sódio<sup>1</sup>.

Após o encaixe nas flanges, a cerâmica era recoberta

<sup>1</sup> Modo de preparo: são dissolvidos 30g de agar-agar em pó em 700ml de solução 30000 ppm de NaCl e aquecidos, com agitação, a cerca de 100°C, até adquirir consistência próxima a um gel. Acrescenta-se ainda 100 ppm de formaldeído para evitar crescimento bacteriano. Por resfriamento, rapidamente ocorre a gelificação da mistura.

por mais uma camada de agar-agar nos dois lados que ficam expostos; este procedimento é necessário para criar uma ponte salina entre as células eletroquímicas e o meio poroso. O gel de agar-agar isola hidraulicamente a amostra das células, evitando assim que produtos formados em decorrência da eletrólise da água em solução salina (como por exemplo NaOH) interfiram nos resultados, mascarando a real contribuição do fenômeno eletro-osmótico isolado; porém não fica impedida passagem de cargas elétricas, permitindo assim que o circuito eletroquímico seja completado.

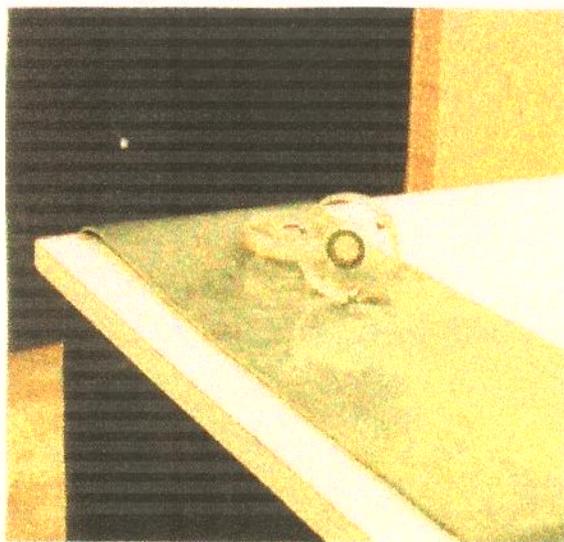


Figura 3.7 - Fotografia das flanges de acrílico do aparato experimental

A vedação foi aperfeiçoada com a utilização de lençol de borracha nitrilica (para evitar ataque químico por hidrocarbonetos) cortada em círculos vazados e comprimidas entre a amostra e as flanges e entre as duas faces das flanges. As flanges são ligadas entre si através de varões rosqueados.

É importante observar que as câmaras de acrílico foram preenchidas com um meio poroso artificial moldado com areia e adesivo epoxi (Araldite) - Figura 3.8 de modo a encaixar nas conexões existentes; a finalidade dessa peça foi a de reduzir o volume "morto" para evitar erros de precisão na medição de volumes injetados ou produzidos, principalmente na ocasião da troca de fluidos. A fotografia da Figura 3.9 mostra o aparato acima descrito montado sobre um suporte e a da Figura 3.10 mostra o conjunto aparato - equipamentos - instrumentos esquematizados na Figura 3.6.



Figura 3.8 - Fotografia do meio poroso artificial que preencheu as câmaras de acrílico

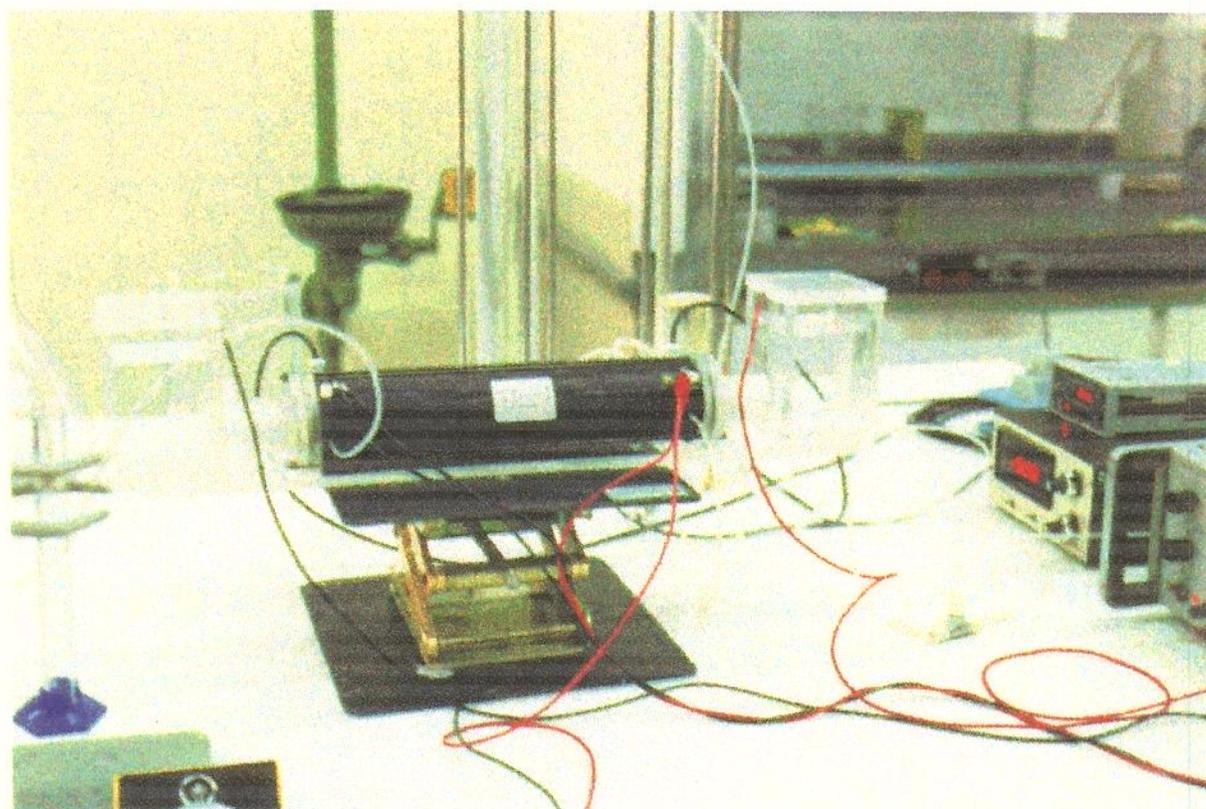


Figura 3.9 - Fotografia do aparato experimental : meio poroso encapsulado e células eletroquímicas.

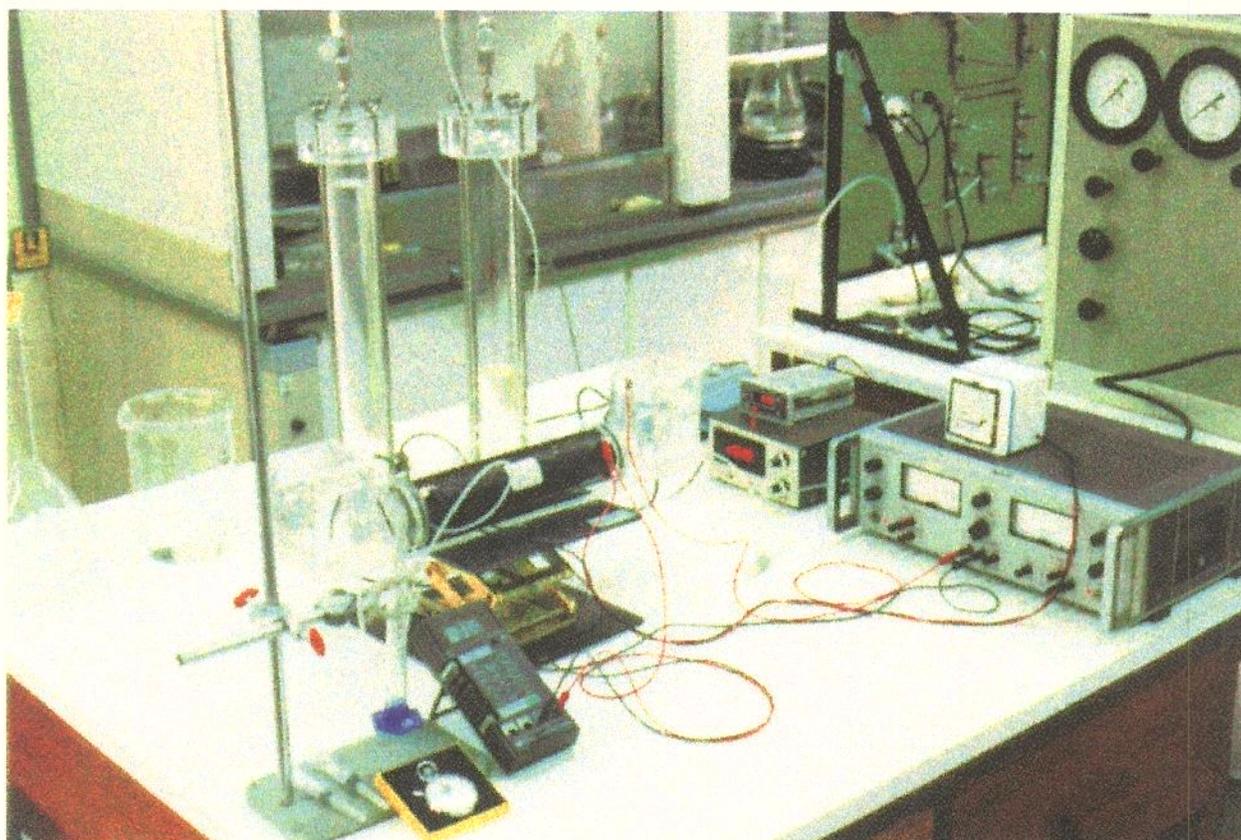


Figura 3.10 - Fotografia do conjunto aparato - equipamentos - instrumentos

Para a execução dos testes, todo o conjunto foi colocado em uma estufa termostaticada (Figura 3.11) de modo a manter a amostra à temperatura média de 40°C, temperatura essa medida no reservatório R1A do campo de Dom João e que está acima do ponto de névoa do óleo ali armazenado.

Foi então necessário promover a exaustão dos gases produzidos durante a eletrólise (hidrogênio e oxigênio) nos recipientes de acrílico, evitando assim a geração de uma atmosfera explosiva. Para isso foram colocadas tampas vedando as caixas com uma saída para mangueiras que conduziam os gases para a capela de exaustão.

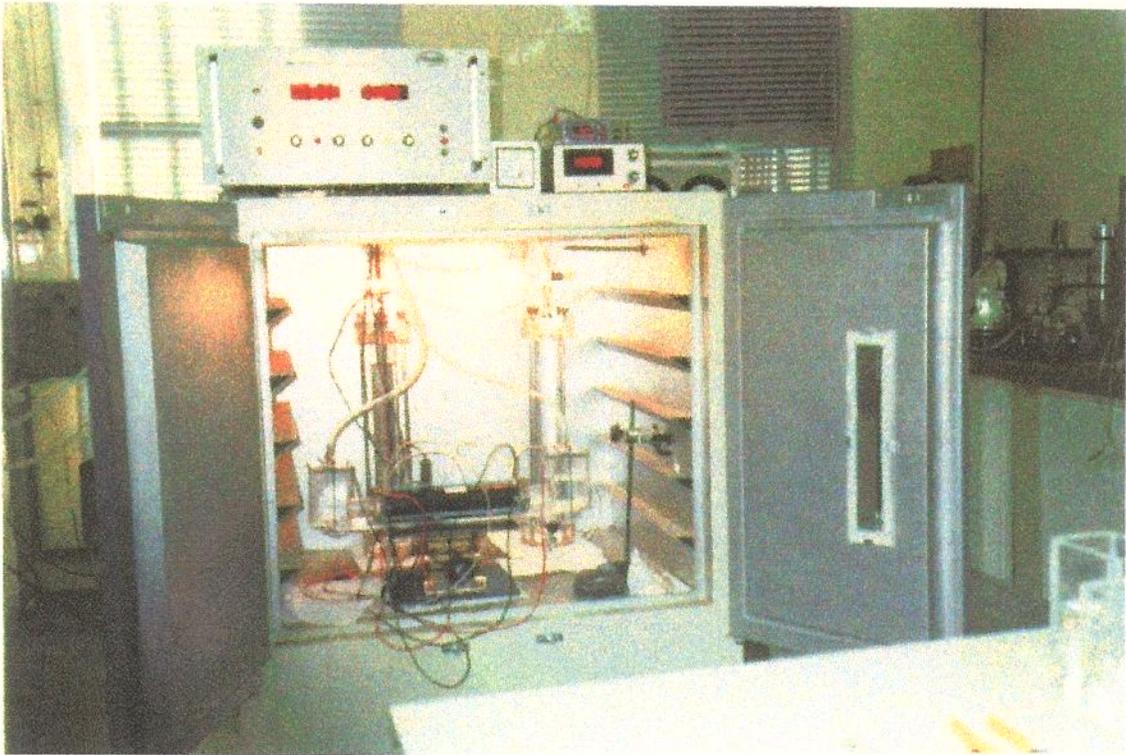


Figura 3.11 - Fotografia do aparato experimental dentro da estufa termostaticada

### 3.3 Fluidos utilizados

Conforme citado, foram utilizados:

- querosene de aviação:** obtido da Refinaria do Planalto (PETROBRÁS/REPLAN), em Paulínia.
- óleo de parafina comercial, marca NUJOL.**
- petróleo do poço DJ-100:** desidratado no CENPES (Centro de Pesquisas da Petrobrás)
- solução salina sintética:** com composição descrita no anexo B preparada de modo a reproduzir a composição média da água residente no reservatório R1A da formação Sergi do campo de Dom João. Em seguida, essa solução foi diluída na razão de 1 para 33.

No Anexo B estão mostradas as curvas de viscosidade em função da temperatura para os fluidos acima citados, obtidas no Instituto de Química da UNICAMP e no laboratório do Departamento de Petróleo da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP. (Figuras B.1, B.2 ,B.3, e B.4)

### 3.4 Programação dos testes

Os testes foram programados com os seguintes objetivos:

1. Verificação da ocorrência da eletro-osmose por aplicação de uma diferença de potencial através do meio poroso, em testes de deslocamento de óleo por água (solução salina), e a quantificação desse efeito em relação à ausência do campo elétrico, isolando o efeito do aquecimento resistivo, que pode causar redução de viscosidade e expansão do volume dos fluidos.
2. Obtenção dos coeficientes de permeabilidade eletro-osmótica ( $k_e$ ) conforme sua definição original, ou seja, com o meio poroso cem por cento saturado com água e também na presença de duas fases, óleo e água, em diferentes estágios de saturação:
  - meio poroso saturado com óleo, na saturação de água irreduzível.
  - meio poroso saturado com água na saturação de óleo residual.

Foi então programada a seguinte seqüência de operações a ser seguida nos testes com cada amostra:

1. medição de permeabilidade ao ar,
2. saturação da amostra com solução salina, após submetê-la a vácuo,
3. medição de permeabilidade à água,
4. medição do coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica ( $k_e$ ), com a amostra 100% saturada com água,
5. injeção de óleo (petróleo ou querosene) até atingir a saturação de água irreduzível ( $S_{wi}$ ) ou seja, não haver mais produção de água; a água produzida nessa etapa é coletada e medida para efeito de cálculo da  $S_{w,i}$ ,

6. medição de permeabilidade ao óleo, na  $S_{wi}$ ,
7. medição do coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica nesse estágio de saturação (amostra saturada com óleo, na  $S_{wi}$ ),
8. injeção de água, com ou sem corrente elétrica, de acordo com o caso em questão, medindo os volumes recuperados, até atingir a saturação de óleo residual ( $S_{or}$ ), ou seja, até não haver mais produção de óleo, e
9. medição do coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica nesse estágio de saturação (amostra saturada com água, na  $S_{or}$ ).

### 3.5 Procedimentos

Na etapa inicial, foram preparadas amostras pequenas, com a finalidade de aprendizado do processo de compactação sob pressão, com resina epoxi. Essas amostras iniciais foram denominadas TP-01, TP-02, TP-03 (teste preliminar nº 1, nº 2, e nº 3, respectivamente) e foram inclusive radiografados para verificação do sucesso do procedimento, como centralização e vedação, por exemplo.

Em seguida foram preparadas as amostras denominadas de TD-01 a TD-12 (testes definitivos nº 1 a nº 12), cujas características estão apresentadas na Tabela 3.1.

**TABELA 3.1.** Características de permo-porosidade das amostras.

Amostra	Comprimento (cm)	Volume poroso (cm <sup>3</sup> )	Porosidade ( $\phi$ ) (%)	Permeabilidade ao ar (k) - (mD)
TD - 01				4800*
TD - 02				157
TD - 03	25,7	74	25,3	106
TD - 04	25,6	87	29,8	337
TD - 05	24,5	76	27,2	260
TD - 06	25,0	76	26,7	251
TD - 07	25,3	96	34,0	4720*
TD - 08	25,0	80	28,0	365
TD - 09	25,2	77	27,0	164
TD - 10	24,9	81	28,5	337
TD - 11	23,5	78	27,0	314
TD - 12	24,5	78	28,0	535

(\*) *Só areia ;*

*as demais: areia + argila.*

O teste com a amostra TD-01 constituída apenas de areia, foi útil na constatação da ocorrência da eletro-osmose em um meio poroso de granulometria e permeabilidade mais elevadas do que a maioria dos trabalhos publicados apresentaram, pois muitos deles tratam de amostras de solos, constituídos apenas de argilas. Esse teste foi útil também para a verificação do funcionamento dos equipamentos de medição, como por exemplo o termopar, e das faixas de valores de corrente e temperatura geradas, servindo assim para a tomada de decisões quanto aos testes seguintes.

Uma das decisões importantes foi a redução da concentração da solução salina, de 33000 ppm em NaCl para 1000 ppm em NaCl e consequente diluição em outros sais. Isto porque, com a solução concentrada, o meio apresentava-se muito pouco resistivo, permitindo a passagem de corrente elétrica na faixa de 200 mA, com diferenças de potencial da ordem de 100 V. Nesse nível de potência, o aquecimento devido ao efeito Joule é significativo, tendo provocado aquecimento do meio poroso até a vaporização dos fluidos. Em consequência, houve aumento brusco de produção após a vaporização. Esse fato prejudicou as medidas do coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica.

Sendo o objetivo principal desse trabalho o estudo do fenômeno da eletro-osmose isolado do efeito de aquecimento resistivo (o qual já é mais conhecido), o caminho escolhido para ultrapassar o problema do aquecimento foi tornar o meio menos condutor através da redução da concentração da solução salina, diminuindo assim a potência gerada, pois a corrente elétrica torna-se menos intensa.

Previamente, foi pesquisada a influência dessa medida na eficiência da eletro-osmose.

A redução da concentração iônica pode causar aumento do potencial Zeta devido ao aumento da espessura da dupla camada elétrica. Conforme Equação 2.31 o coeficiente de permeabilidade é diretamente proporcional ao potencial Zeta, porém sofre efeito também do fator de resistividade da formação (F).

MITCHELL (1976) apresenta uma figura esquemática (Figura 3.12) para previsão de eficiência de eletro-osmose em função da concentração de eletrólitos, de acordo com os tipos de argilas existentes no sistema.

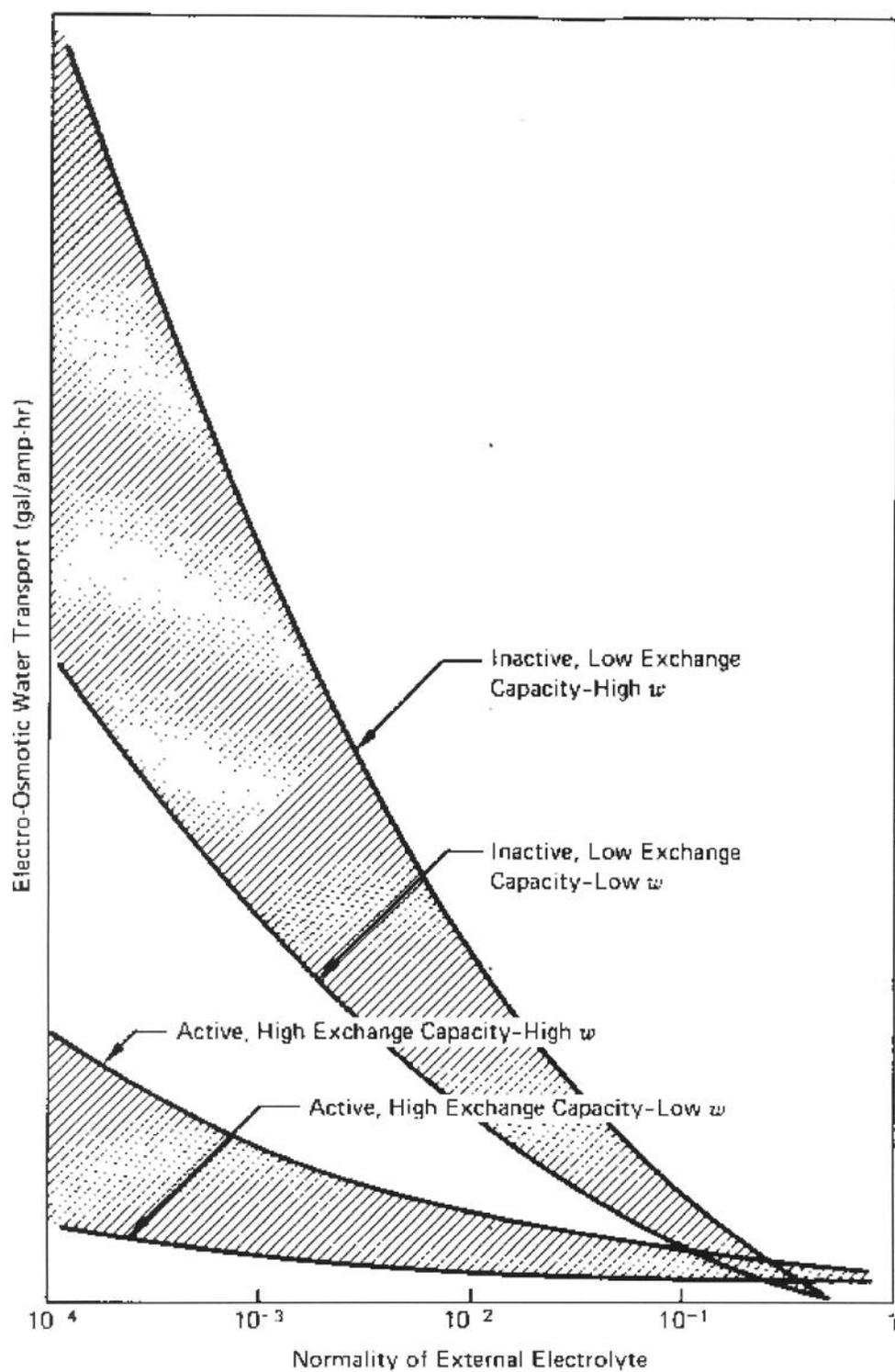


Figura 3.12 - Eficiência eletro - osmótica em função da concentração da solução eletrolítica ( de MITCHELL, 1976)

No presente estudo, as argilas, segundo a tabela abaixo (MACHADO, 1987) apresentam alta capacidade de troca catiônica. Sendo assim, o processo em questão seria pouco afetado pela concentração da solução salina.

**TABELA 3.2.** Capacidade de troca de cátions dos argilominerais.

<b>Argilomineral</b>	<b>CTC, meq/100g</b>
esmectita	70 - 130
ilita e clorita	10 - 40
caulinita	3 - 15

*OBS.: A areia fina (2 - 62 $\mu$ m) apresenta CTC da ordem de 1 meq/100g.*

Além disso, LOCKHART (1983), em sua pesquisa laboratorial, concluiu, segundo ele contrariando as expectativas tradicionais, que altas concentrações de eletrólitos não são necessariamente prejudiciais à secagem eletro-osmótica, podendo até ser benéficas.

Logo, apesar da polêmica existente quanto a essa questão, concluiu-se que, de acordo com o material existente, não se incorreria em erros na quantificação do coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica, com a redução da concentração de solução salina para 1000 ppm em NaCl, (conforme os experimentos pioneiros de AMBA, 1963), além de ser viabilizado o isolamento do efeito desejado.

O teste com a amostra TD-02 (constituída de areia e argila) deveria ser o primeiro da seqüência de testes válidos, tendo sido programado para medição dos coeficientes eletro-osmóticos já com a solução salina diluída e para sofrer injeção de querosene, sem aplicação de campo elétrico e representando assim a rodada-base no deslocamento desse fluido com água.

Foi possível cumprir as etapas programadas para o teste (vide item 3.4) até a de nº 4, com uma pequena alteração, mantida nos testes subsequentes: na etapa nº 2, a amostra foi saturada com solução salina concentrada, para em seguida sofrer injeção de cerca de dois volumes porosos de solução diluída. Esse procedimento teve como objetivo minimizar efeitos de inchamento de argilas.

seguida sofrer injeção de cerca de dois volumes porosos de solução diluída. Esse procedimento teve como objetivo minimizar efeitos de inchamento de argilas.

Ao se iniciar a injeção de querosene (etapa nº 5), houve uma redução drástica na permeabilidade a este fluido até o entupimento total, ou seja, todos os esforços no sentido de prosseguir com a injeção foram infrutíferos: a vazão era nula apesar de ter sido elevado o gradiente hidráulico aplicado.

Na tentativa de entender o ocorrido, foram realizados testes de contato entre os meios porosos e o querosene em proveta e em diversos tubos finos com mangueiras transparentes; nestes últimos, sempre no início do escoamento do querosene havia uma redução na vazão (efeitos de permeabilidade relativa), entretanto, os testes prosseguiram sem maiores problemas.

Considerou-se que o problema ocorrido com a amostra TD-02 foi devido a alguma característica intrínseca de heterogeneidade da mesma, que pode ter sido agravado por algum efeito de interação com o querosene utilizado.

Decidiu-se recomeçar esse teste com outra amostra, substituindo apenas o querosene comercial que vinha sendo utilizado pelo querosene de aviação.

Foram realizados, então, mais dez testes com os seguintes objetivos além da medição dos coeficientes de permeabilidade eletro-osmótica:

**Teste 1:** Rodada-base para o deslocamento de querosene por água, sem aplicação de gradiente de potencial elétrico.

**Teste 2:** Deslocamento de querosene por água, com aplicação de gradiente de potencial elétrico, na configuração 1.

**Teste 3:** Deslocamento de querosene por água, com aplicação de gradiente de potencial elétrico, na configuração 2.

**Teste 4:** Rodada-base para o deslocamento de óleo do campo de Dom João por água.

**Teste 6:** Deslocamento de óleo do campo de Dom João por água, com aplicação de gradiente de potencial elétrico, na configuração 2.

**Teste 7:** Repetição do teste 3.

**Teste 8:** Repetição do teste 4.

**Teste 9:** Teste-extra, utilizando o óleo de parafina NUJOL.

**Teste 10:** Repetição do teste 5.

Essas características, ao lado das amostras utilizadas, encontram-se tabeladas a seguir (Tabela 3.3).

**TABELA 3.3.** Característica e programação dos testes.

Número do teste	Fluidos		Aplicação de gradiente de potencial elétrico	Configuração	Amostra utilizada
	Fase óleo	Fase água			
1	Querosene de aviação	Sol. Salina diluída	Não	—	TD-03
2	Querosene de aviação	Sol. Salina diluída	Sim	1 (catodo-produtor)	TD-06
3	Querosene de aviação	Sol. Salina diluída	Sim	2 (catodo-injetor)	TD-05
4	Óleo de Dom João	Sol. Salina diluída	Não	—	TD-04
5	Óleo de Dom João	Sol. Salina diluída	Sim	1 (catodo - produtor)	TD-08
6	Óleo de Dom João	Sol. Salina diluída	Sim	2 (catodo-injetor)	TD-10
7 (Rep. teste 3)	Querosene de aviação	Sol. Salina diluída	Sim	2 (catodo-injetor)	TD-09
8 (Rep. teste 4)	Óleo de Dom João	Sol. Salina diluída	Não	—	TD-11
9	Óleo de parafina NUJOL	Sol. Salina diluída	Sim	2 (catodo-injetor)	TD-07
10 (Rep. teste 5)	Óleo de Dom João	Sol. Salina diluída	Sim	1 (catodo-produtor)	TD-12

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são registradas observações e comentários a respeito de cada um dos testes:

### 4.1.1 Teste 1 (querosene - rodada base)

Neste teste, foram cumpridas todas as etapas programadas. Os resultados obtidos para os coeficientes de permeabilidade eletro-osmótica estão apresentados na Tabela 4.1.

Os resultados obtidos no teste de deslocamento estão apresentados nos gráficos das Figuras 4.1, 4.19, e 4.22 . A erupção de água ocorreu após injeção de 16 % do volume poroso. As curvas de permeabilidades relativas obtidas estão mostradas no gráfico da Figura 4.2<sup>8</sup>. Como o objetivo desse teste era o de servir como uma rodada-base, não houve aplicação de tensão elétrica na etapa de recuperação por injeção de água, de modo que os dois testes seguintes pudessem fornecer informações sobre o efeito eletro-osmótico .

### 4.1.2 Teste 2 (querosene - configuração 1)

Neste teste, foi possível medir os coeficientes de permeabilidade eletro-osmótica, cujos resultados estão apresentados na Tabela 4.1.

Na etapa nº 5 (injeção de querosene) foi observada produção exagerada de água; constatou-se que ocorreu um pequeno vazamento na ligação entre a célula eletroquímica e a câmara de produção.

Ficou assim prejudicada a determinação da saturação de água irreduzível ( $S_{wi}$ ) e a decisão tomada foi a de estimar esse valor pelo teste com a amostra TD-05, que também seria utilizada com o fluido querosene e que possuía características permo-porosas praticamente idênticas às da amostra TD-06.

---

<sup>8</sup> A metodologia empregada para a obtenção dessas curvas foi a de JOHNSON *et alli* (1959), utilizando os dados brutos obtidos em laboratório. O tratamento dos dados foi feito através do cálculo de regressão em gráfico log-normal, no qual foi obtida a curva apresentada.

TABELA 4.1. Coeficientes de permeabilidade eletro-osmótica medidas.

Nº Teste	Amostra	Ke (Sw=100%) (cm <sup>2</sup> /V.S)	Ke (Swi) (cm <sup>2</sup> /V.S)	Ke (Sor) (cm <sup>2</sup> /V.S)	Swi (%)	Sor (%)
1	TD - 02	3,35 x 10 <sup>-5</sup>				
1	TD - 03	2,20 x 10 <sup>-5</sup>	7,31 x 10 <sup>-7</sup>	6,50 x 10 <sup>-6</sup>	50	30,5
2	TD - 04	1,78 x 10 <sup>-5</sup>	3,61 x 10 <sup>-6</sup>	1,19 x 10 <sup>-5</sup>	39,6	38,6
3	TD - 05	2,09 x 10 <sup>-5</sup>	2,31 x 10 <sup>-6</sup>	—	39,6	42,7
4	TD - 06	2,91 x 10 <sup>-5</sup>	6,28 x 10 <sup>-6</sup>	1,11 x 10 <sup>-5</sup>	51,7	6,4
5	TD - 07	2,23 x 10 <sup>-5</sup>	5,85 x 10 <sup>-6</sup>	1,31 x 10 <sup>-5</sup>	52,8	5,0
6	TD - 08	2,27 x 10 <sup>-5</sup>	3,61 x 10 <sup>-6</sup>	1,37 x 10 <sup>-5</sup>	46,9	13,7
7	TD - 09	2,88 x 10 <sup>-5</sup>	4,63 x 10 <sup>-6</sup>	9,30 x 10 <sup>-6</sup>	47,8	36,0
8	TD - 10	2,80 x 10 <sup>-5</sup>	9,19 x 10 <sup>-6</sup>	2,74 x 10 <sup>-5</sup>	47,4	13,6
9	TD - 11	1,19 x 10 <sup>-5</sup>	2,03 x 10 <sup>-6</sup>	—	21,9	26,4
10	TD - 12	4,44 x 10 <sup>-5</sup>	1,19 x 10 <sup>-6</sup>	1,58 x 10 <sup>-5</sup>	40,4	12,2

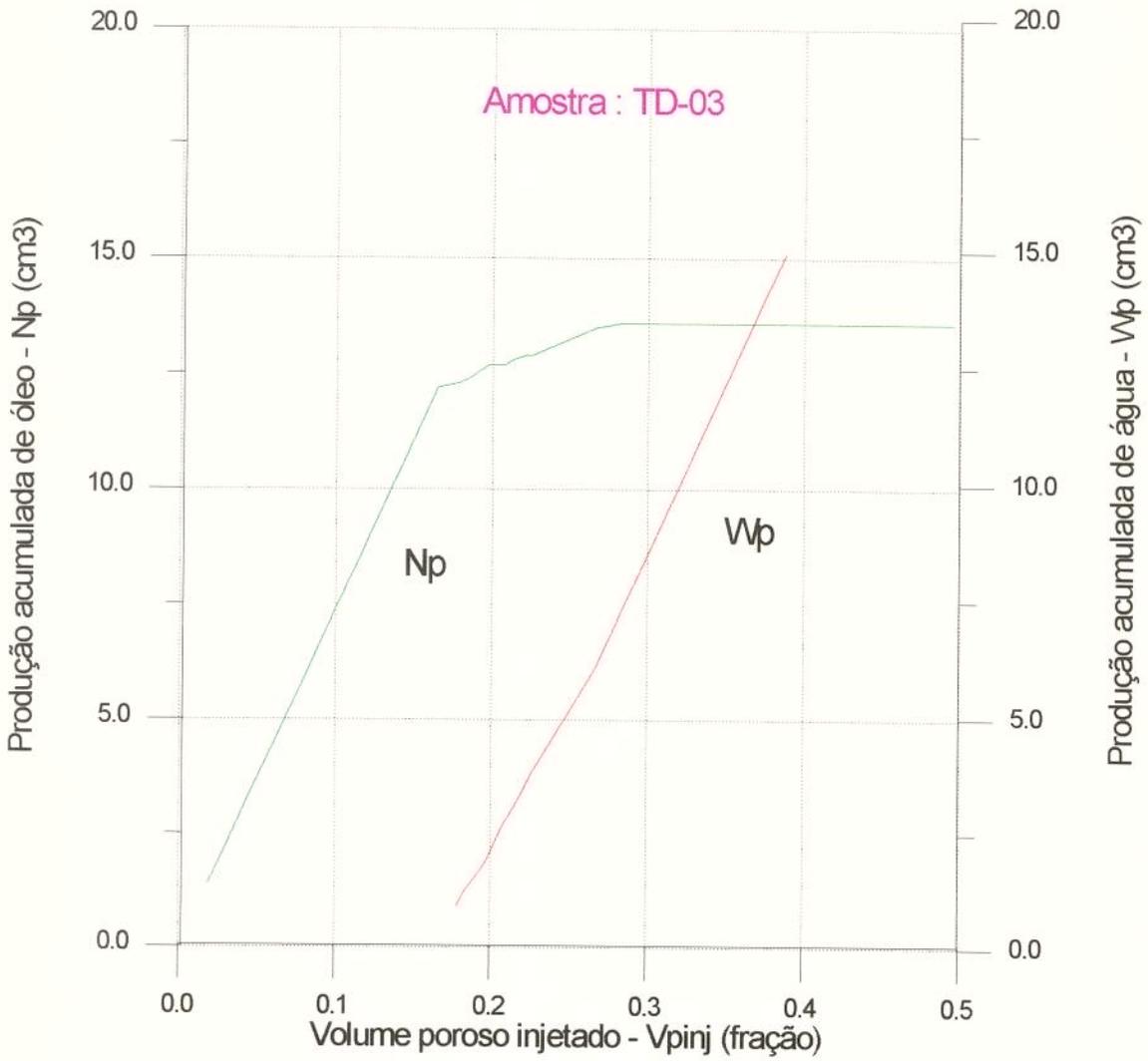


Figura 4.1 - Produção acumulada de óleo e água  
 Teste no.1 - Querosene  
 Rodada Base

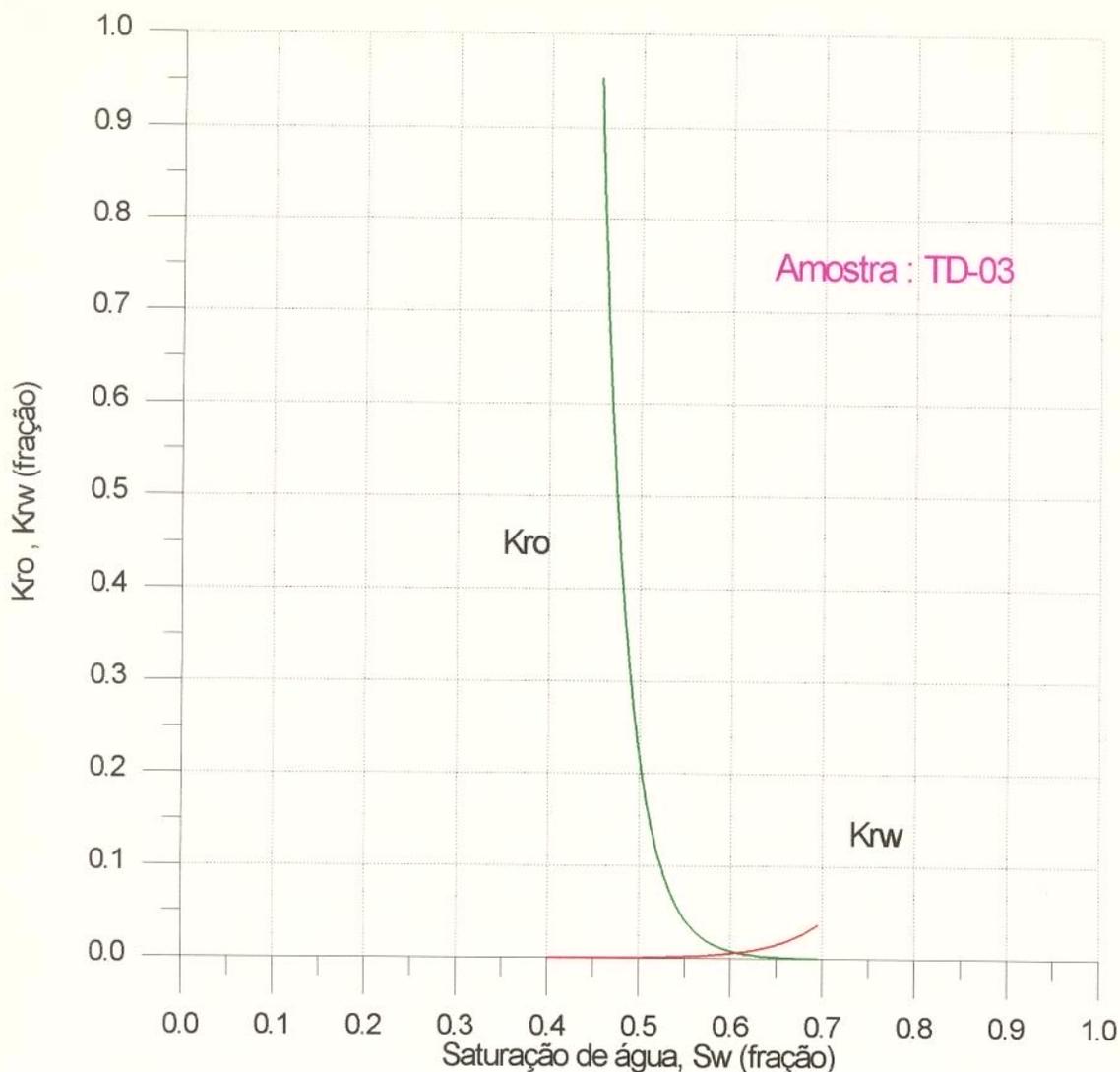


Figura 4.2 - Curvas de permeabilidades relativas  
Sistema óleo - água  
Teste no.1

Os resultados obtidos nos testes de deslocamento estão apresentados nos gráficos das Figuras 4.3, 4.19, e 4.22 .

As curvas de permeabilidades relativas para o sistema querosene-água estão apresentadas no gráfico da Figura 4.4. Essas curvas mostram o aumento da permeabilidade relativa a água. Neste teste, durante a etapa de injeção de água, foi aplicado um potencial elétrico de 200 Volts tendo havido aquecimento máximo de 10°C ao final do teste.

Observa-se que, em relação à rodada-base houve uma antecipação da erupção de água, (após injeção de 7% do volume poroso) e um perfil de razão

água-óleo acumulada maior, causando assim um retardamento no perfil de produção de óleo.

Comparando a curva de vazão de injeção versus volume poroso injetado deste teste com a do anterior, observa-se que a dificuldade para injetar água é crescente com o volume acumulado de água injetada.

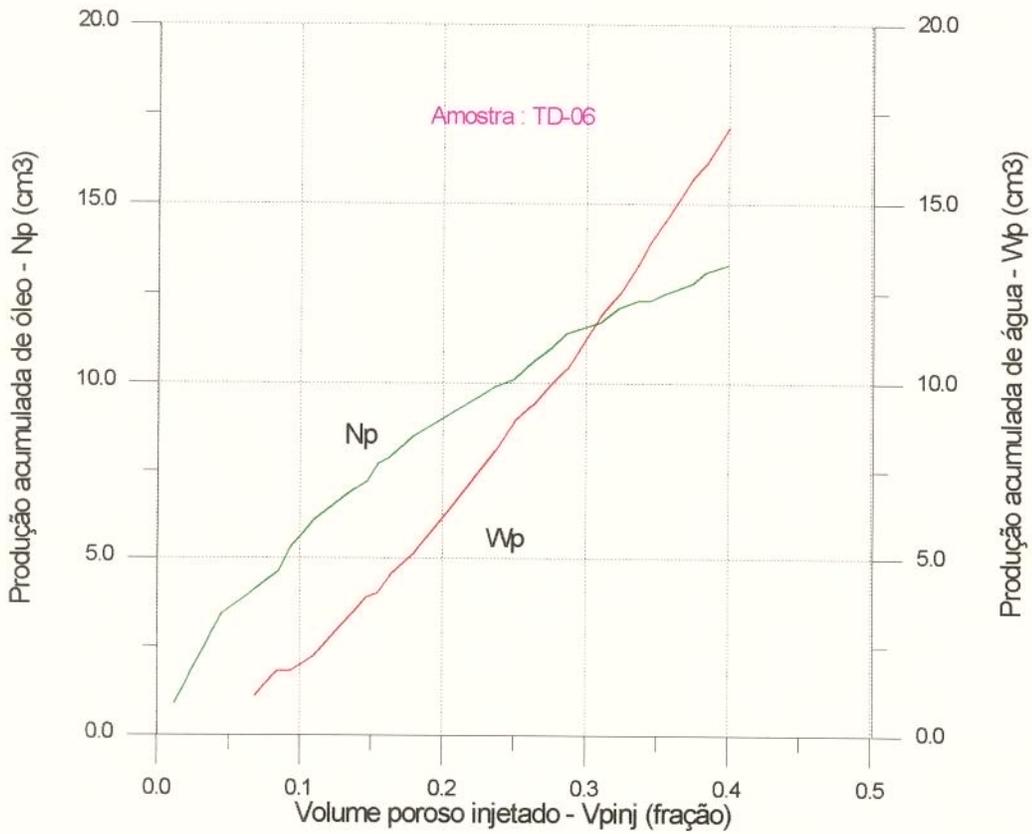


Figura 4.3 - Produção acumulada de óleo e água  
Teste no.2 - Querosene  
Configuração 1

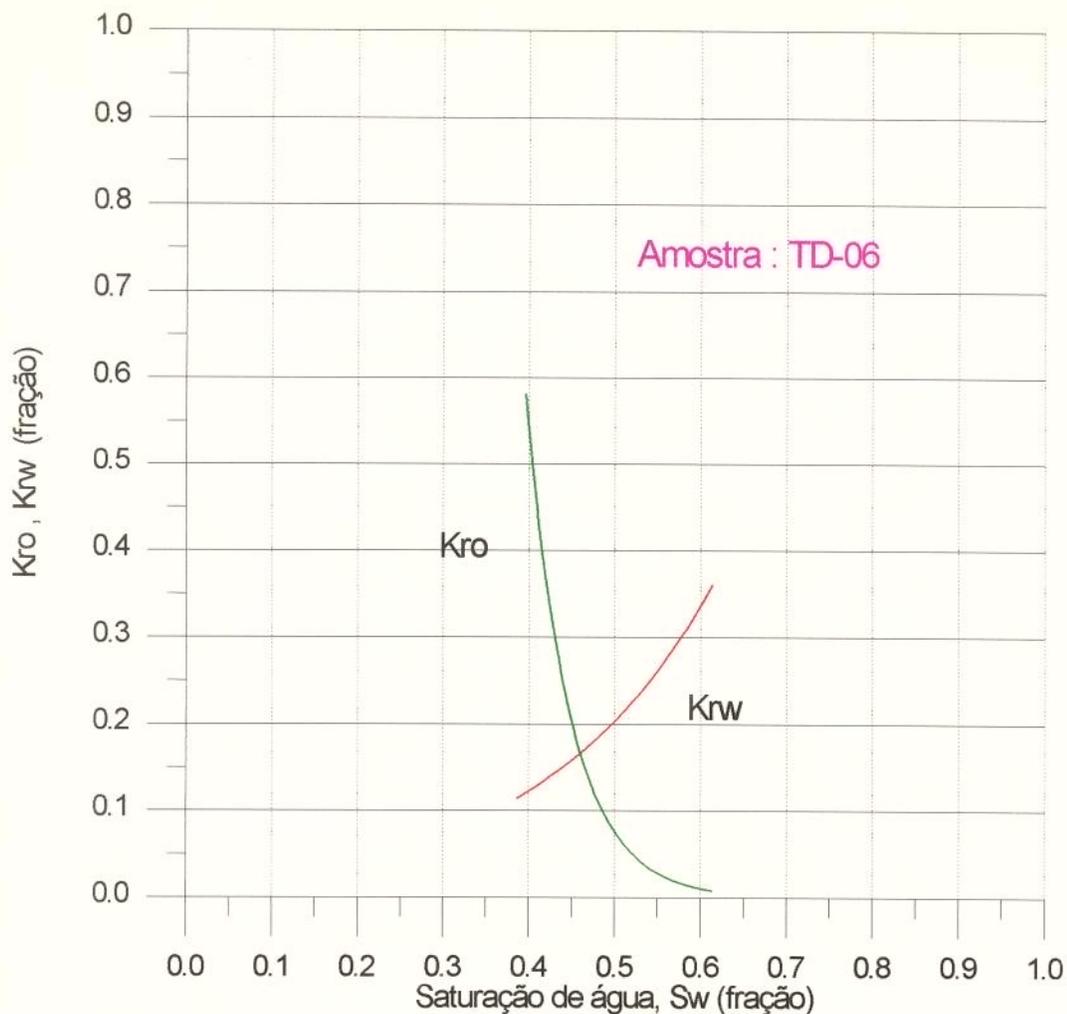


Figura 4.4 - Curvas de permeabilidades relativas  
Sistema óleo - água  
Teste no.2

#### 4.1.3 Teste 3 (querosene - configuração 2)

Este teste foi realizado até a etapa 8, na configuração 2, com  $\Delta E = 200V$  não tendo sido esta completada devido aos fatos relatados a seguir. Observou-se ao longo do teste o aparecimento de ar ou outro gás na linha de produção, causando acentuada queda de vazão de injeção e da corrente elétrica. O teste foi conduzido até a produção acumulada de óleo de 12,6 ml, valor este próximo à recuperação final dos testes anteriores (13,6 ml e 13,3 ml, respectivamente) quando então já era praticamente impossível prosseguir o teste, com esta configuração. Decidiu-se, a partir daí, inverter a configuração (para que o catodo passasse à extremidade de produção), para fins de comparação. Observou-se aumento acentuado na vazão de injeção (de 1,3  $cm^3/h$  para 5,4

cm<sup>3</sup>/h), na corrente elétrica (de 7,1 para 13,4 mA) ,e redução visível do volume de gás nas linhas.

Os resultados obtidos para os coeficientes de permeabilidade eletrosmótica estão apresentados na Tabela 4.1.

Os resultados obtidos no teste de deslocamento estão apresentados nos gráficos das Figuras 4.5 e 4.22.

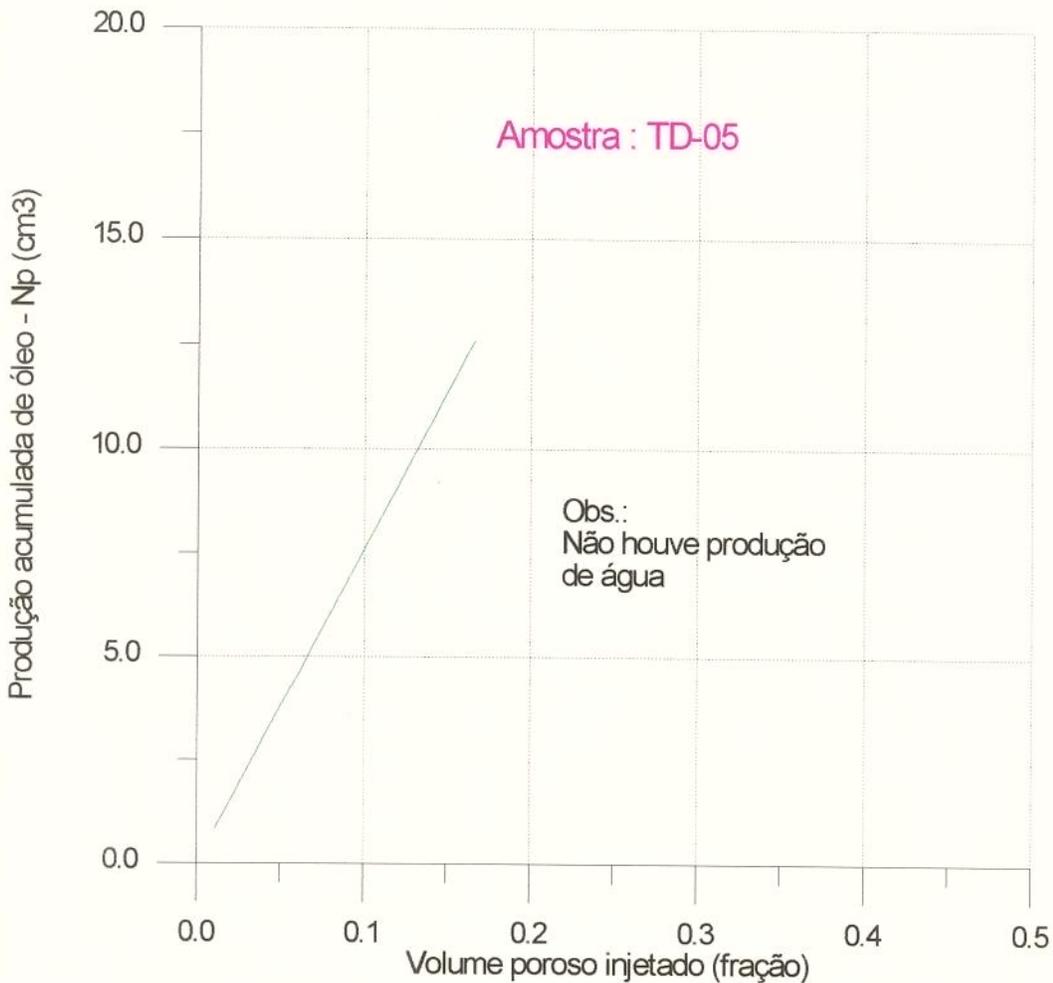


Figura 4,5 - Produção acumulada de óleo e água  
Teste no.3 - Querosene  
Configuração 2

Uma observação importante a ser feita é que não houve produção de água no período de duração do teste.

Como o aparecimento de gás na linha de produção não pôde ser completamente explicado (o aumento de temperatura até o final do teste foi de apenas 8°C), decidiu-se que este teste seria repetido posteriormente.

#### 4.1.4 Teste 4 (óleo de Dom João - rodada base)

Neste teste, agora com o óleo do campo de Dom João, foram cumpridas todas as etapas programadas, exceto a de número 6.

Os resultados obtidos para os coeficientes de permeabilidade eletrosmótica estão apresentados na Tabela 4.1.

Os resultados obtidos no teste de deslocamento estão apresentados nos gráficos das Figuras 4.6, 4.21 e 4.24. A erupção de água ocorreu após a injeção de 16,6% do volume poroso.

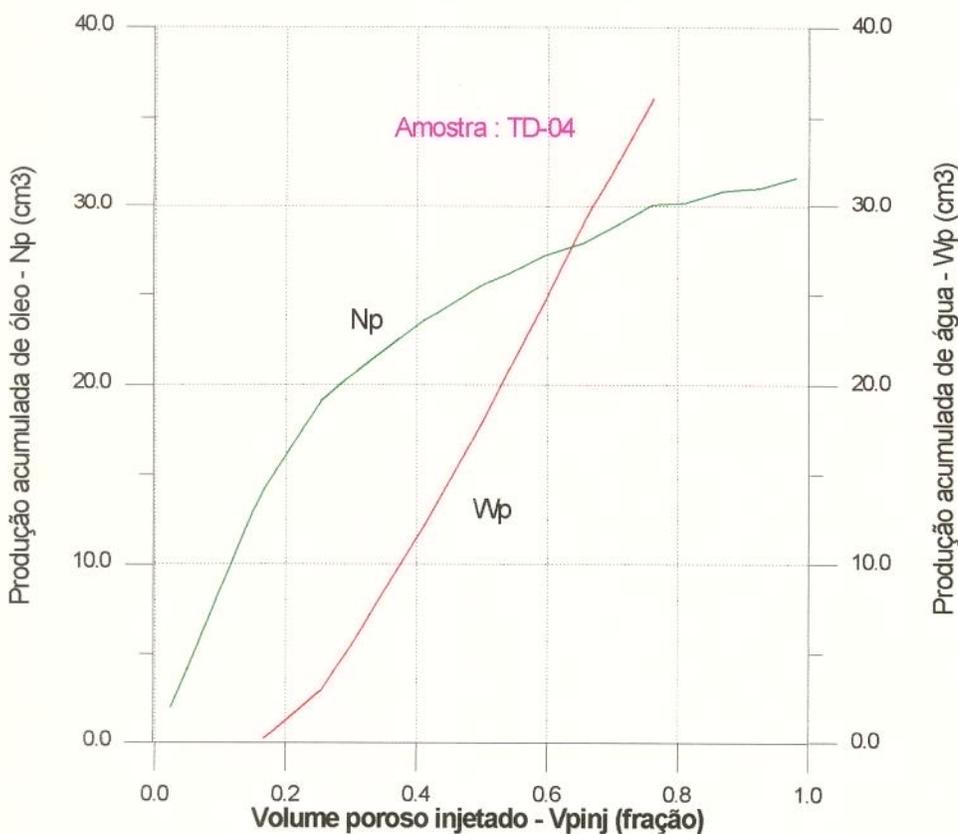


Figura 4.6 - Produção acumulada de óleo e água  
Teste no.4 - óleo de Dom João  
Rodada Base

As curvas de permeabilidades relativas para o sistema óleo-água obtidas estão apresentadas no gráfico da Figura 4.7.

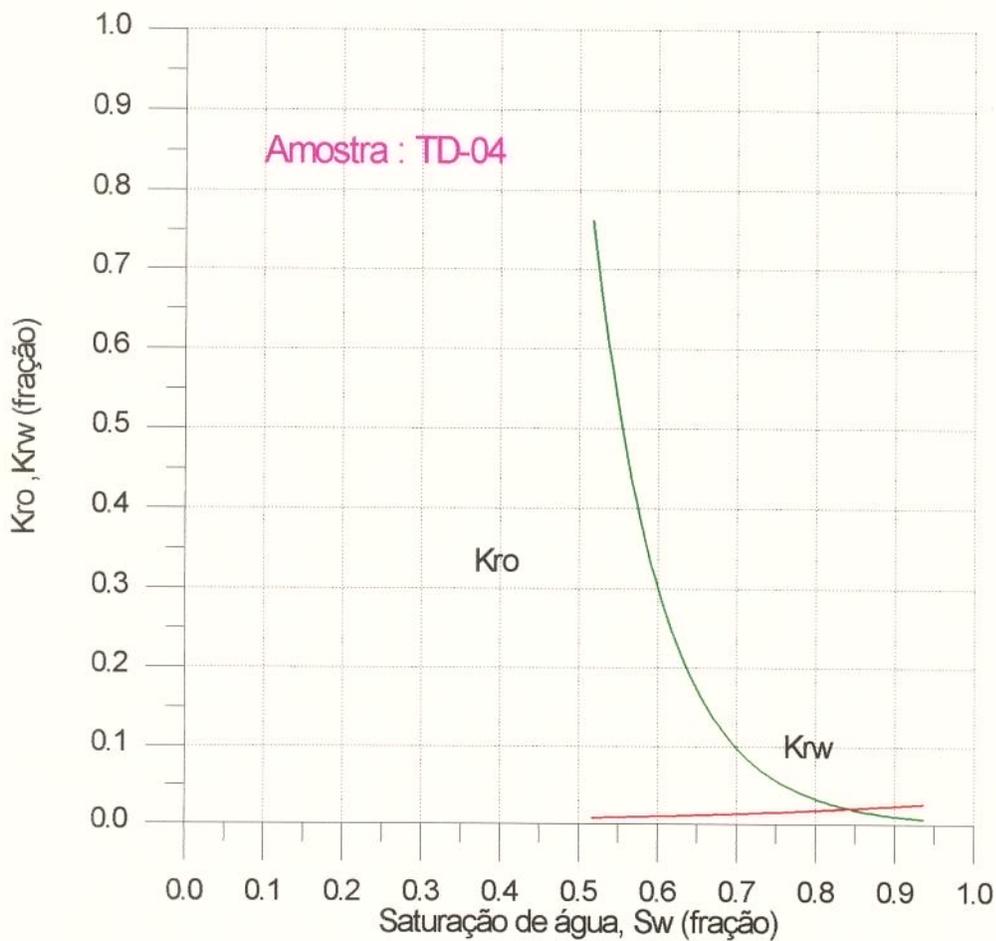


Figura 4.7 - Curvas de permeabilidades relativas  
Sistema óleo - água  
Teste no.4

Nesse teste não houve aplicação de tensão elétrica na etapa de recuperação de óleo por injeção de água, por se tratar de rodada-base para o caso do campo de Dom João.

#### 4.1.5 Teste 5 (óleo de Dom João - configuração 1)

Neste teste foram cumpridas todas as etapas programadas. Os resultados obtidos para os coeficientes de permeabilidade eletro-osmótica estão apresentados na Tabela 4.1.

Os resultados obtidos no teste de deslocamento estão apresentados nos gráficos das Figuras 4.8, 4.21, e 4.24. Foi aplicada na etapa de recuperação de petróleo por injeção de água uma diferença de potencial elétrico de 125 V, o que corresponde a um gradiente de cerca de 5 V/cm. Com isso, o aumento de temperatura máxima ocorrida durante o teste foi de 5°C.

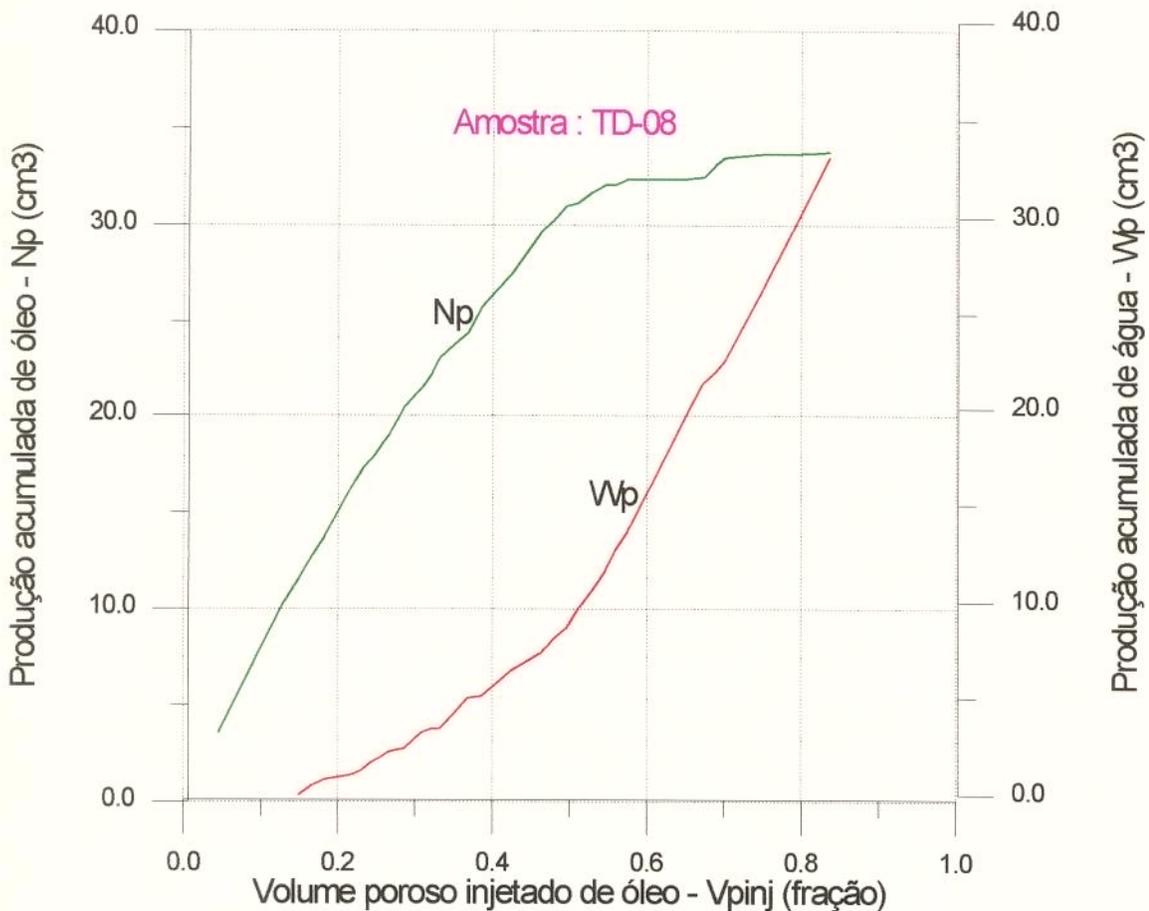


Figura 4,8 - Produção acumulada de óleo e água  
Teste no.5 - óleo de Dom João  
Configuração 1

A intensidade da corrente elétrica através do meio poroso situou-se na faixa de 18 a 33,5 mA.

A erupção de água ocorreu após injeção de 14,9% de volume poroso, o que representou uma pequena antecipação em relação à rodada-base (teste 4).

Observou-se, neste teste, contrariamente ao que ocorreu com o teste análogo, com querosene, que o perfil de razão água-óleo acumulada de produção foi menor do que o da rodada-base, e que a curva de vazão de injeção versus volume de injeção de água em termos de fração de volume poroso foi descendente, enquanto que na rodada-base esta curva foi ascendente.

As curvas de permeabilidades relativas para o sistema em questão estão apresentadas no gráfico da Figura 4.9 e refletem a redução da permeabilidade relativa à água devido à passagem da corrente elétrica quando comparada com a rodada-base.

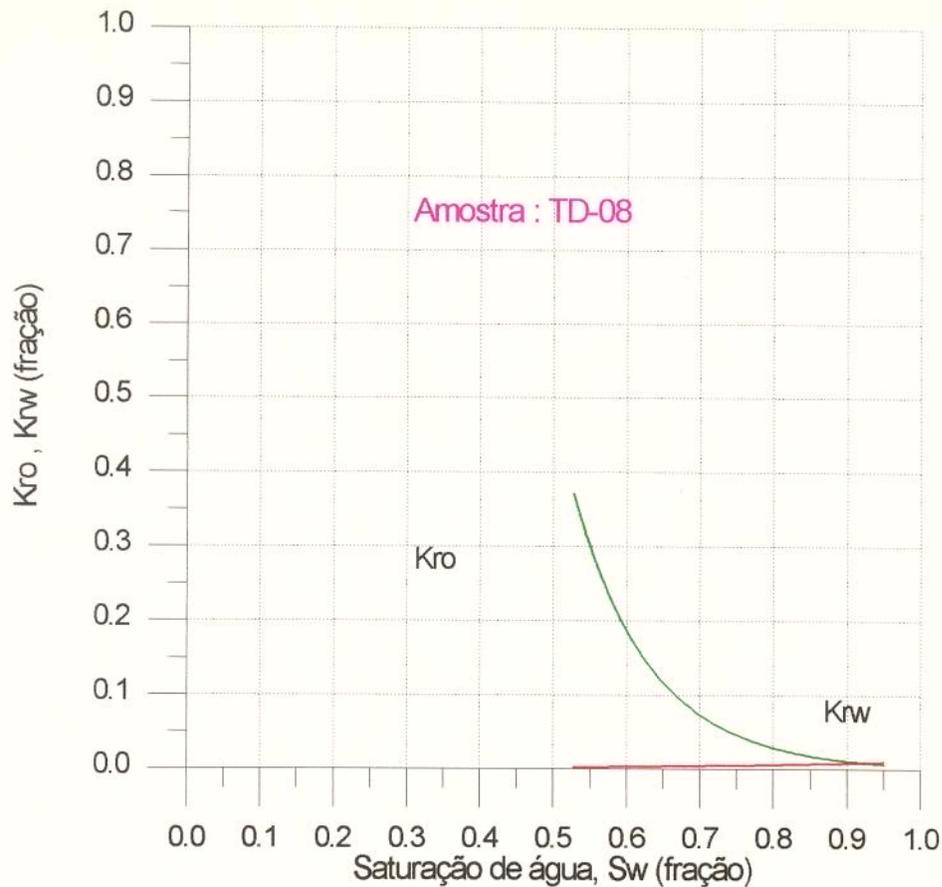


Figura 4.9 - Curvas de permeabilidades relativas  
Sistema óleo - água  
Teste no.5

#### 4.1.6 Teste 6 (óleo de Dom João - configuração 2)

Este teste foi concluído com sucesso, estando os resultados obtidos para os coeficientes de permeabilidade eletro-osmótica apresentados na Tabela 4.1.

O teste de deslocamento, com aplicação de potencial elétrico de 125 volts forneceu resultados bastante interessantes, conforme pode ser observado nos gráficos das figuras 4.10, 4.21, e 4.24. Não houve produção de água até que se tivesse quase atingido a recuperação final de óleo. O teste não foi de modo algum comprometido pelo aparecimento de gás, como no caso do querosene. A erupção de água só ocorreu após a injeção de 38,3% de volume poroso, o que confirma a tese de AGGOUR (1992, 1994) sobre a retenção da água injetada, possibilitando a antecipação da produção de óleo, livre da produção de água.

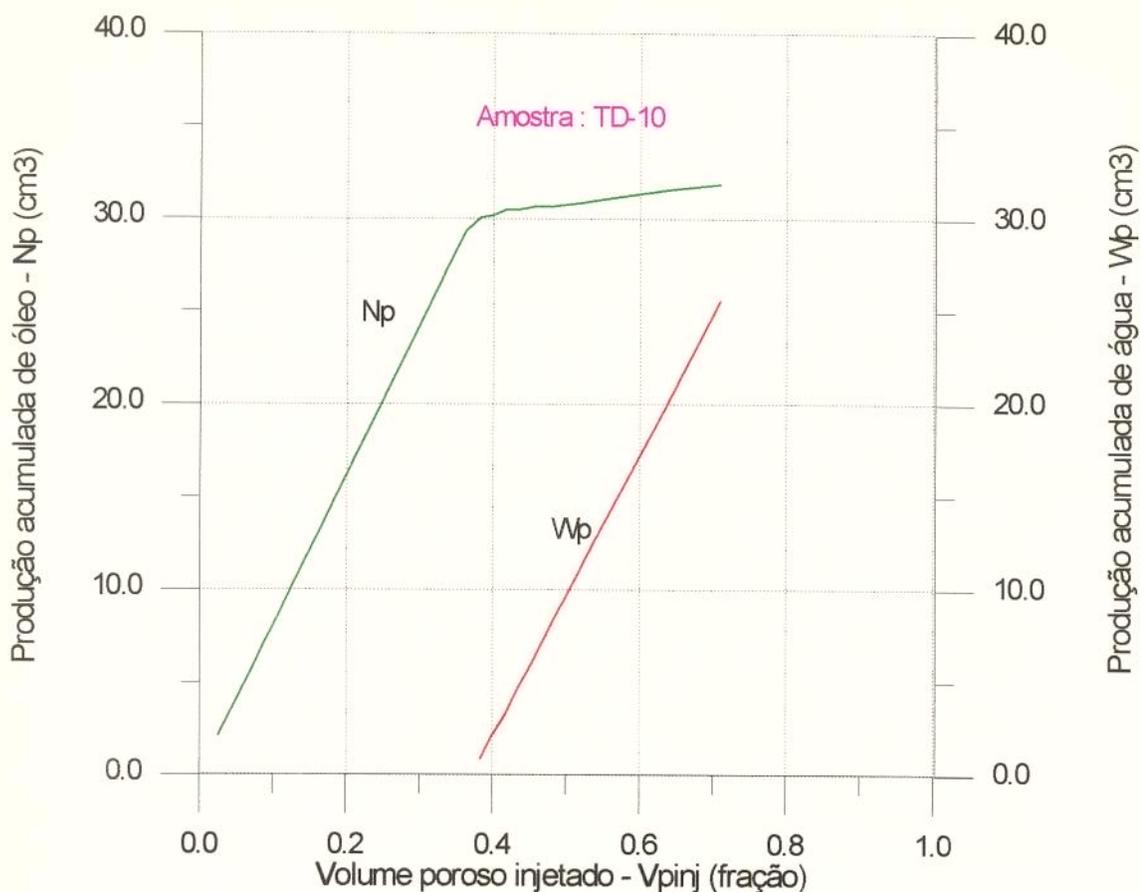


Figura 4.10 - Produção acumulada de óleo e água  
 Teste no.6 - óleo de Dom João  
 Configuração 2

A curva de vazão de injeção versus volume de água injetado em termos de fração de volume poroso (Figura 4.24) mostra que enquanto a água está sendo retida por eletro-osmose, aumenta a dificuldade de injeção, o que se reverte depois da erupção quando a saturação do meio poroso é praticamente a do óleo residual.

A intensidade da corrente elétrica passando através do meio poroso situou-se na faixa de 5,4 a 25,1 mA e o aumento máximo de temperatura foi de 5°C.

#### 4.1.7 Teste 7 (querosene - configuração 2 - repetição)

Este teste teve como objetivo repetir o teste 3, para verificar se o aparecimento de gás na linha de produção teria sido devido a algum problema na montagem do aparato experimental.

Entretanto, embora tenham sido tomados todos os cuidados possíveis na montagem, o mesmo comportamento se repetiu durante o teste de deslocamento conforme pode ser observado nos gráficos das Figuras 4.11 e 4.22.

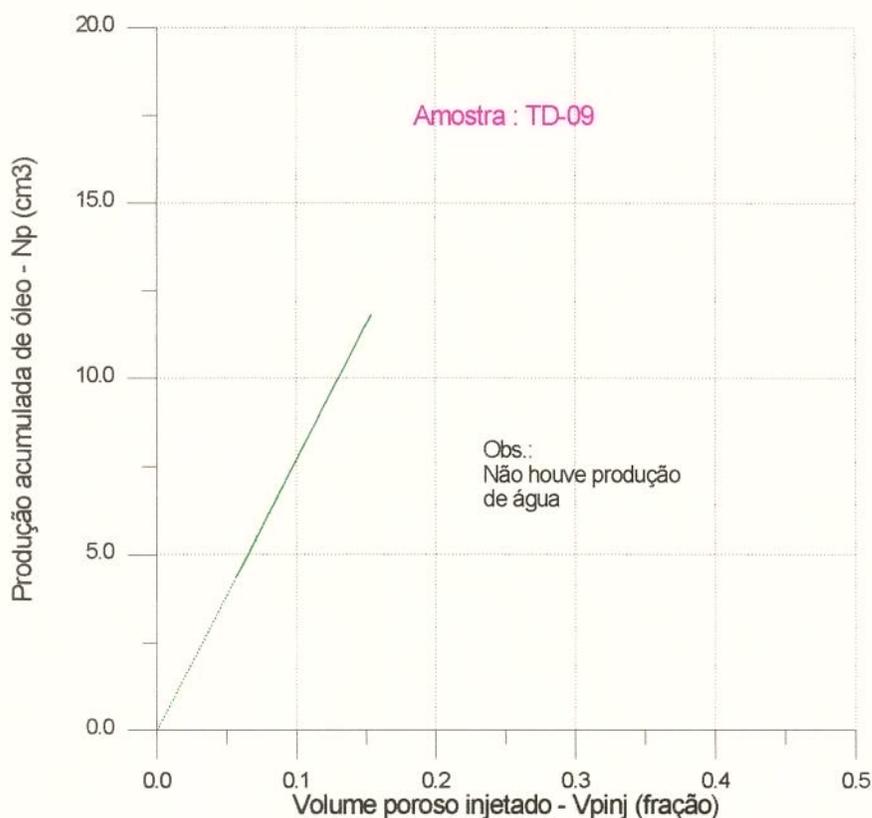


Figura 4.11 - Produção acumulada de óleo  
Teste no.7 - Querosene  
Configuração 2  
(Repetição)

Foi possível obter novamente valores para os coeficientes de permeabilidade eletro-osmótica, apresentados na Tabela 4.1.

A discordância entre os resultados obtidos nos testes 2 e 5, com querosene e óleo de Dom João, respectivamente, e configuração 1, em relação às suas respectivas rodadas-base, motivou a repetição de dois testes com o óleo de Dom João.

A princípio, a suposição foi a de que houvesse ocorrido alguma canalização no teste 4 (óleo Dom João - rodada base), resultando em vazões de produção de água muito elevadas.

#### 4.1.8 Teste 8 (óleo de Dom João - rodada base - repetição )

Os resultados obtidos com este teste confirmaram integralmente o teste análogo realizado anteriormente (teste 4).

Os valores de coeficientes de permeabilidade eletro-osmótica medidos estão apresentados na Tabela 4.1.

Os resultados obtidos nos testes de deslocamento estão apresentados nos gráficos das figuras 4.12, 4.21, e 4.24.

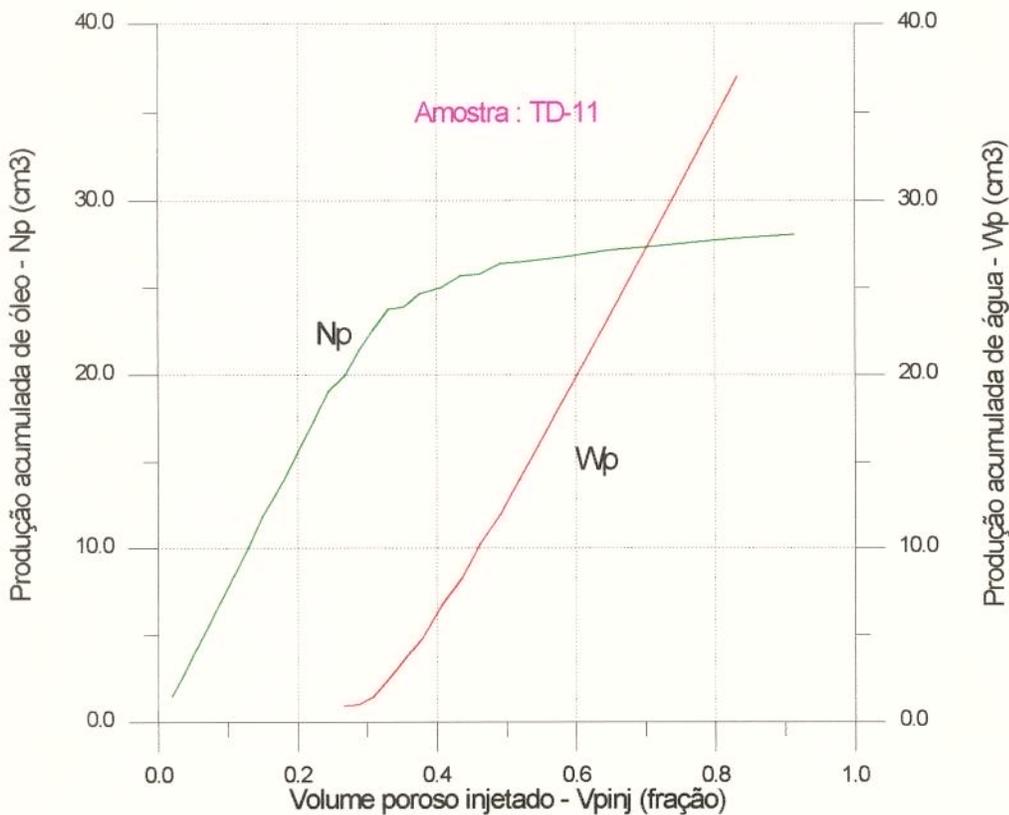


Figura 4.12 - Produção acumulada de óleo e água  
Teste no.8 - óleo de Dom João  
Rodada Base  
(Repetição)

O gráfico da Figura 4.13 ilustra o tratamento das curvas de permeabilidades relativas por regressão. Para este teste, as curvas obtidas estão mostradas no gráfico da Figura 4.14.

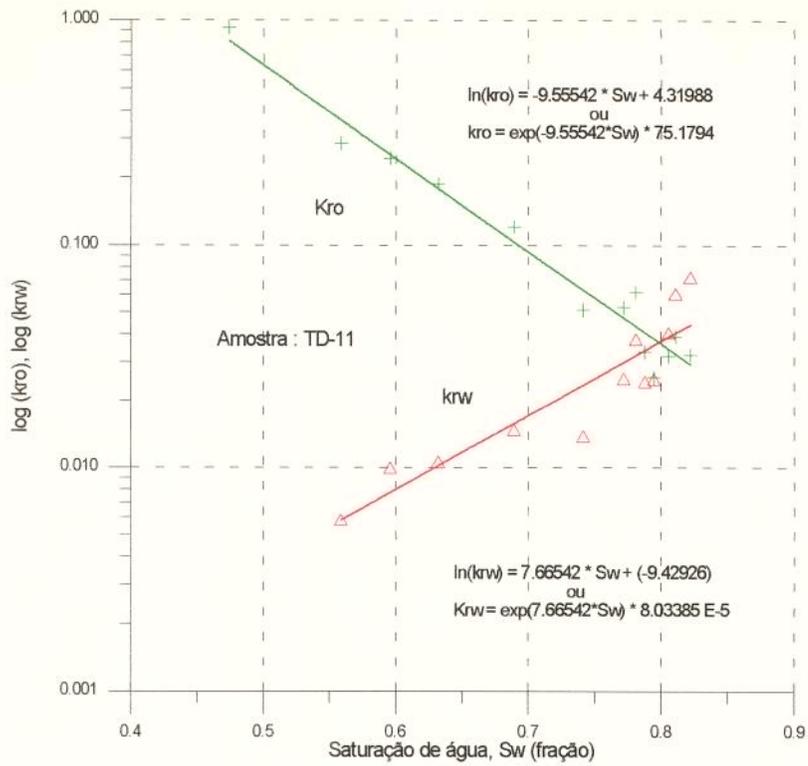


Figura 4.13 - Curvas de permeabilidades relativas  
Sistema óleo - água  
(Regressão)  
Teste no.8

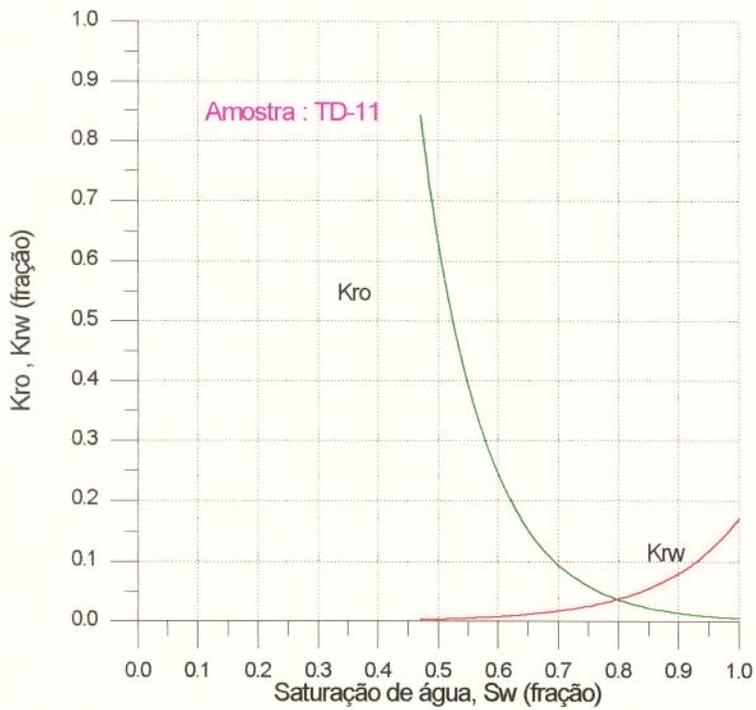


Figura 4.14 - Curvas de permeabilidades relativas  
Sistema óleo - água  
Teste no.8

Os resultados obtidos no teste nº 8 motivaram a realização de mais um teste com o óleo de Dom João, como repetição do teste nº 5 para que de acordo com os resultados, pudessem ser levantadas hipóteses para o comportamento observado.

Nessa fase do trabalho, já estavam sendo questionadas os diferentes níveis de recuperação da querosene e do óleo de Dom João. Foi aventada a possibilidade de estar correndo emulsificação da água no óleo. Foram então feitos testes de contato e agitação em provetas e não foi visível alteração nos volumes originais. Também para investigar essa hipótese, os cilindros graduados que recolheram os volumes produzidos nos testes nº 7 e nº 8 foram pesados antes e após o experimento. Os volumes neles contidos foram lidos, e, de posse das densidades medidas do óleo e da solução salina (vide anexo B), concluiu-se que não poderia ter havido formação de emulsão que justificasse os diferentes níveis de produção.

Foi então questionada a influência da reatividade do querosene (fração da destilação do petróleo), reconhecidamente um poderoso solvente: ocorrendo interação com os componentes do meio poroso, quartzo e argilas, os resultados poderiam estar completamente desviados dos que se desejaria obter de um padrão, quimicamente inerte. Ainda na fase de montagem do aparato, nas primeiras experiências foi observada a sua agressividade em relação às borrachas de vedação e adesivos de silicone utilizados.

Logo, enquanto estava sendo preparada uma nova amostra com areia e argila para repetição do teste nº 8 foi utilizada uma amostra extra, a TD-07, constituída apenas de areia, para um teste com o óleo de parafina marca NUJOL, de modo a avaliar, de maneira mais qualitativa do que quantitativa, a sua adequação à utilização como padrão. Pretendia-se verificar a sua inércia química e suas características de viscosidade.

Foi então realizado o teste nº 9, no qual foram realizadas todas as etapas programadas para os testes anteriores até a de nº 7.

Os resultados obtidos para os coeficientes de permeabilidade eletrosmótica estão apresentados na tabela 4.1.

Na etapa de recuperação de óleo por injeção de água, o deslocamento foi feito à semelhança das rodadas-base ou seja sem aplicação de gradiente de potencial elétrico, até um determinado instante, após a erupção de água e quando já tinha sido injetado um volume de água correspondente a 1.7 vezes o volume poroso. A partir de então foi aplicada a diferença de potencial de 125 V na configuração 2 (catodo na extremidade de injeção) e também foi reduzida à terça parte a diferença de pressão aplicada (devido à alta permeabilidade da amostra, as vazões de produção eram muito altas, prejudicando a observação dos resultados). Os resultados obtidos estão apresentados nos gráficos das Figuras 4.15, 4.20, e 4.23.

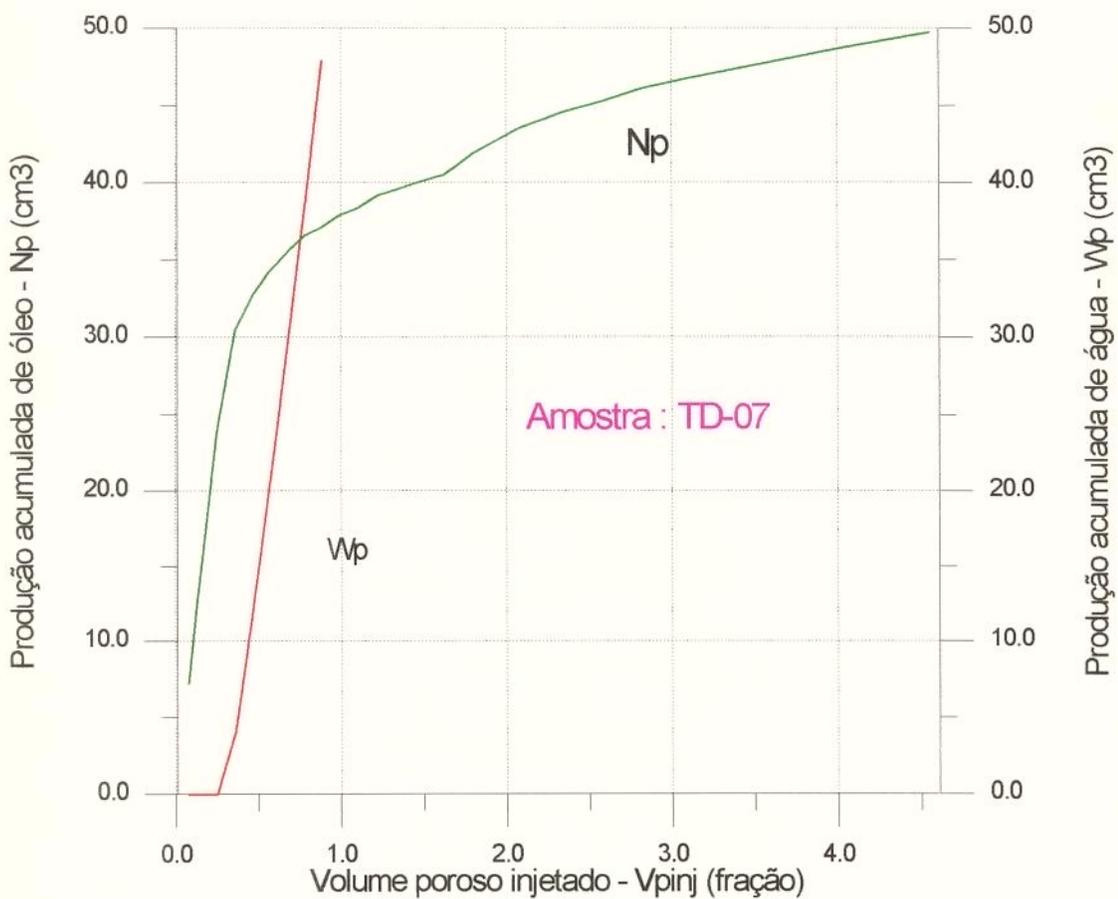


Figura 4.15 - Produção acumulada de óleo e água  
Teste no.9 - óleo NUJOL

Observa-se que neste teste houve produção adicional de óleo devido à passagem de corrente elétrica. A recuperação adicional foi de 25% do volume produzido apenas por injeção de água, o que corresponde a 13,3% do óleo original "in place".

Durante o experimento, a intensidade de corrente elétrica passando através do meio poroso situou-se na faixa de 12,5 a 16,6 mA e o aumento de temperatura máximo ocorrido foi de 5°C.

Um fato importante é que não foi observado aparecimento de gás na linha de produção, como ocorreu no teste com querosene com esta mesma configuração.

Convém ainda registrar que não houve nenhuma dificuldade operacional no manuseio deste fluido, apesar da sua viscosidade ser mais elevada (vide gráfico da Figura B.4).

Outros tipos de comparação com os testes anteriores ficam dificultados devido à característica bastante diferenciada da amostra em termos de composição e permeabilidade e da própria execução do teste de deslocamento, devido a finalidade do teste.

#### **4.1.10 Teste 10 (óleo de Dom João - configuração 1 - repetição)**

Neste teste, além das etapas executadas nos testes anteriores, foi acrescentada mais uma, que seria a de nº 4 A, ou seja, a medição da permeabilidade efetiva à água após passagem da corrente elétrica quando da determinação do primeiro coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica. Esta alteração teve como objetivo verificar se a corrente elétrica no meio em questão teria influência significativa sobre a permeabilidade à água isoladamente.

Os resultados das Tabelas 4.2 e 4.3 mostram que não houve alteração da permeabilidade à água após passagem de corrente elétrica nesse sistema.

Os resultados obtidos para os coeficientes de permeabilidade eletro-osmótica estão apresentados na Tabela 4.1.

O teste de deslocamento forneceu resultados que confirmam totalmente o comportamento observado no teste 5, conforme pode ser observado nos gráficos das Figuras 4.16, 4.21, e 4.24.

As curvas de permeabilidades relativas para o sistema em questão estão apresentadas no gráfico da Figura 4.17.

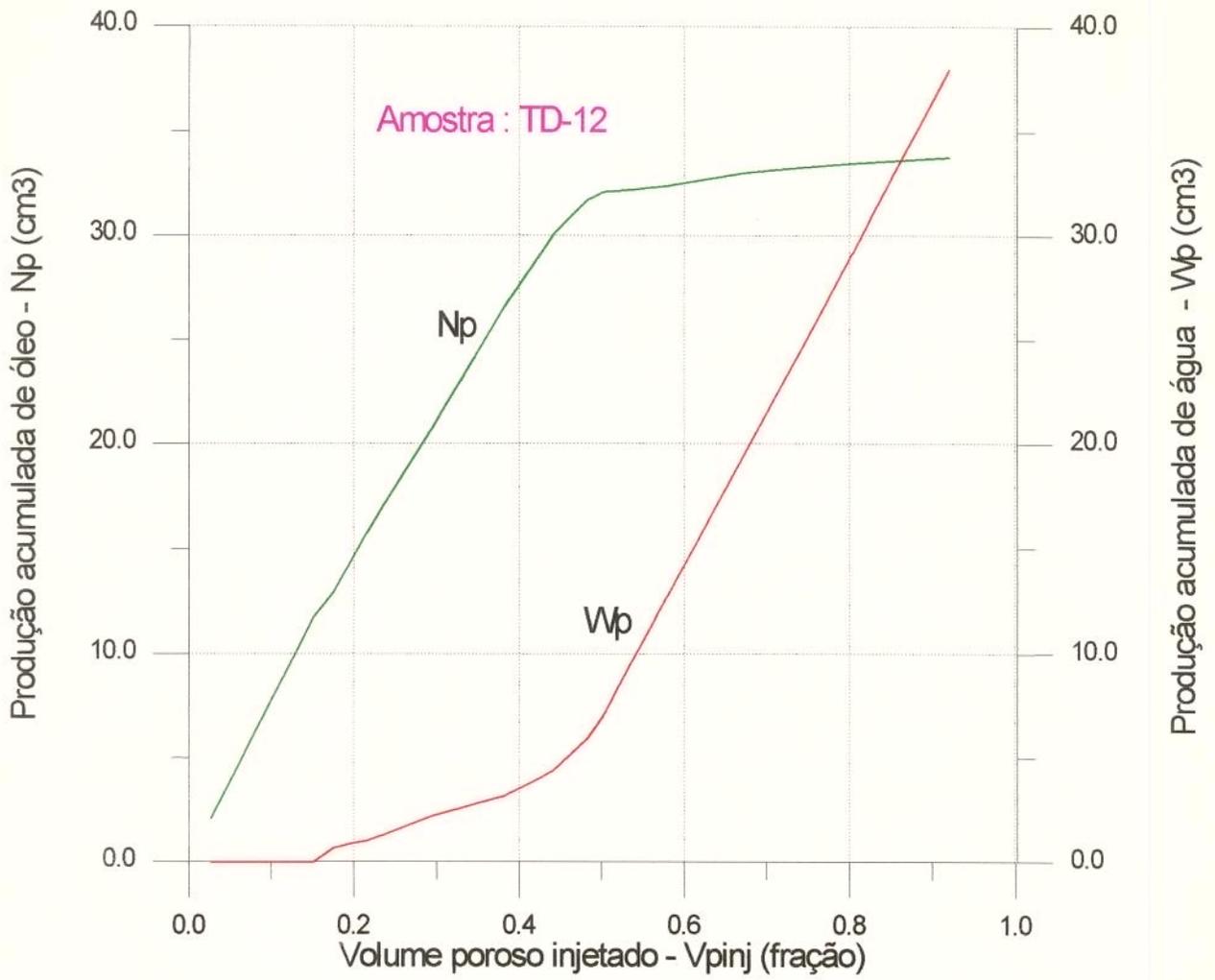


Figura 4.16 - Produção acumulada de óleo e água  
 Teste no.10 - óleo de Dom João  
 Configuração 1  
 (Repetição)

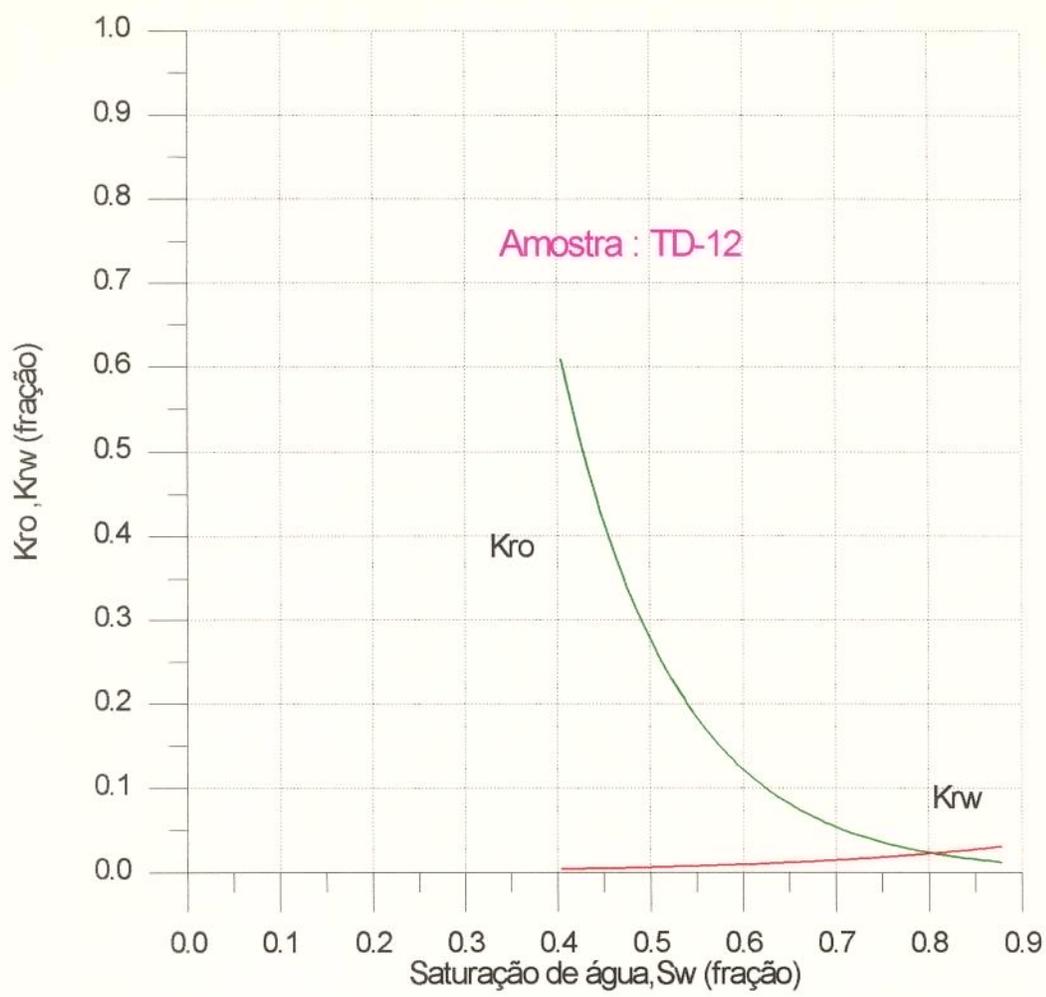


Figura 4.17 - Curvas de permeabilidades relativas  
 Sistema óleo - água  
 Teste no.10

**TABELA 4.2.** Medição de permeabilidade efetiva à água antes da passagem da corrente elétrica, teste 10.

Tempo (s)	$\Delta P$ (psi)	T (°C)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Kw (mD)
233	1,17	37,5	4	307
252	1,16	—	4	287
230	1,14	—	4	320
228	1,13	36,5	4	325
442	1,15	—	8	330

**TABELA 4.3.** Medição de permeabilidade efetiva à água após passagem da corrente elétrica, teste 10.

Tempo (s)	$\Delta P$ (psi)	T (°C)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Kw (mD)
218	1,15	39,5	4	334
221	1,16	39,5	4	327
465	1,16	38,5	8,5	330
220	1,16	38,5	4	328
230	1,16	—	4	314

## 4.2 Efeitos dos fluidos e do campo elétrico sobre os argilominerais

Concluídos os testes, os corpos de prova foram serrados e de cada um deles foi coletada uma amostra do meio poroso. Essas amostras foram submetidas a análise de difratometria de raios X com o objetivo de verificar os efeitos dos fluidos e do campo elétrico sobre os argilominerais do sistema

estudado. Não foi observada variação da mineralogia das argilas contidas nas amostras após os testes. Convém ressaltar que as amostras continham baixo teor de esmectitas expansivas, as quais seriam mais sensíveis ao efeito da corrente elétrica (ANJOS *et al.*, 1994).

### 4.3 Análise conjunta dos resultados

Os resultados obtidos para os coeficientes de permeabilidade eletro-osmótica foram colocados em gráfico, em função da saturação de água (Figura 4.18) e pôde-se observar que, quanto maior a saturação de água no meio poroso, maior é o valor do coeficientes  $k_e$ . Isto evidencia o caráter apolar ou fracamente polar dos petróleos em geral, e particularmente o do campo de Dom João e corrobora os modelos para a eletro-osmose nos quais as soluções salinas aquosas desempenham papel fundamental.

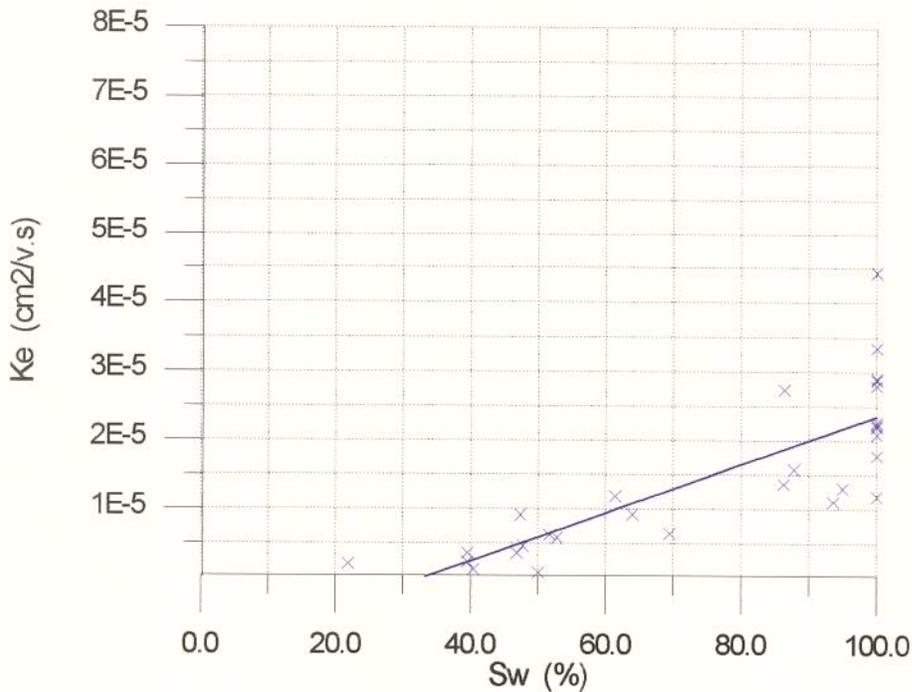


Figura 4.18 - Coeficientes de permeabilidade eletro-osmótica em função da saturação de água

Os gráficos de razão água - óleo e de vazão de injeção para os grupos de testes (querosene, NUJOL e óleo de Dom João) estão mostrados nas Figuras 4.19 a 4.24.

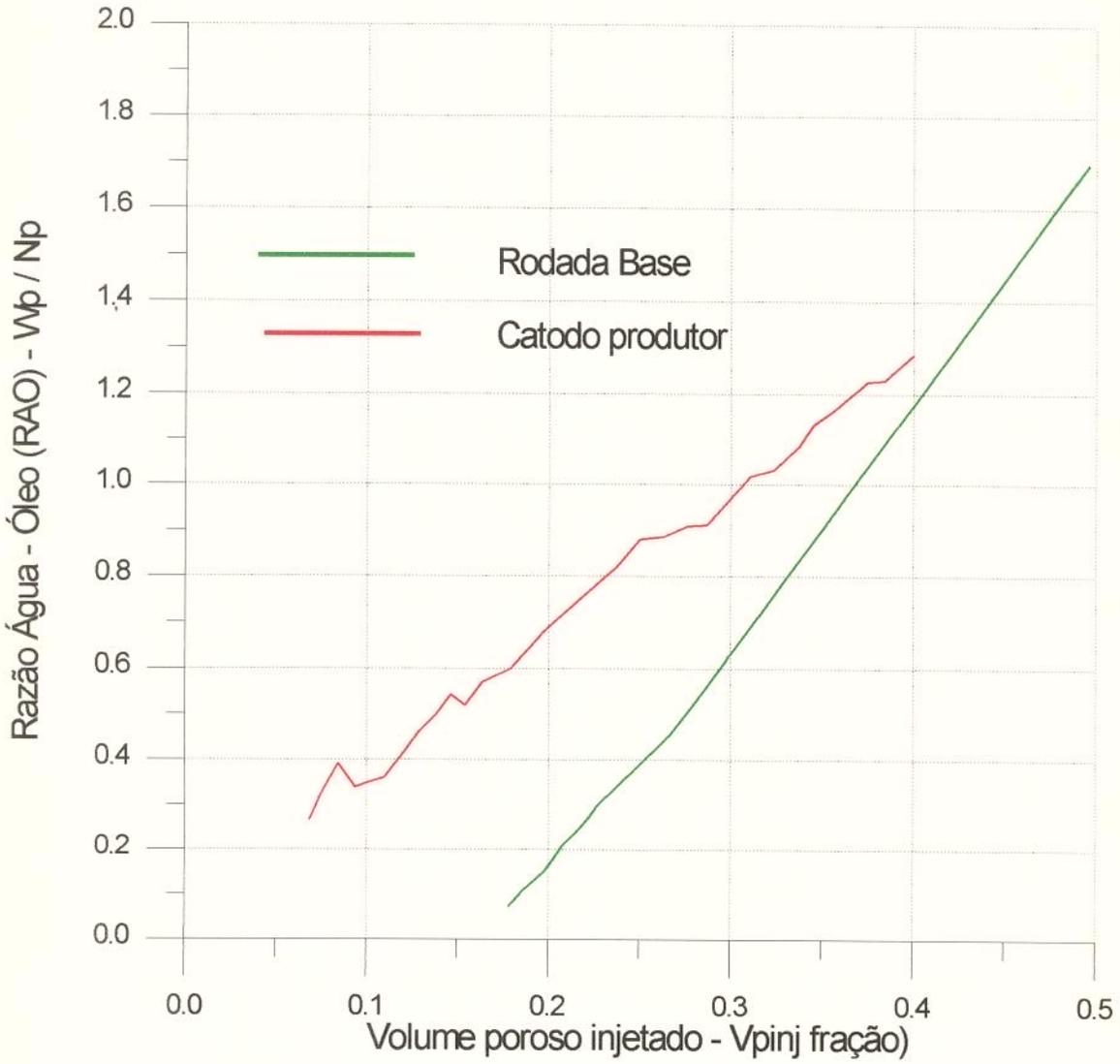


Figura 4.19 - Razão Água - Óleo  
Testes com querosene

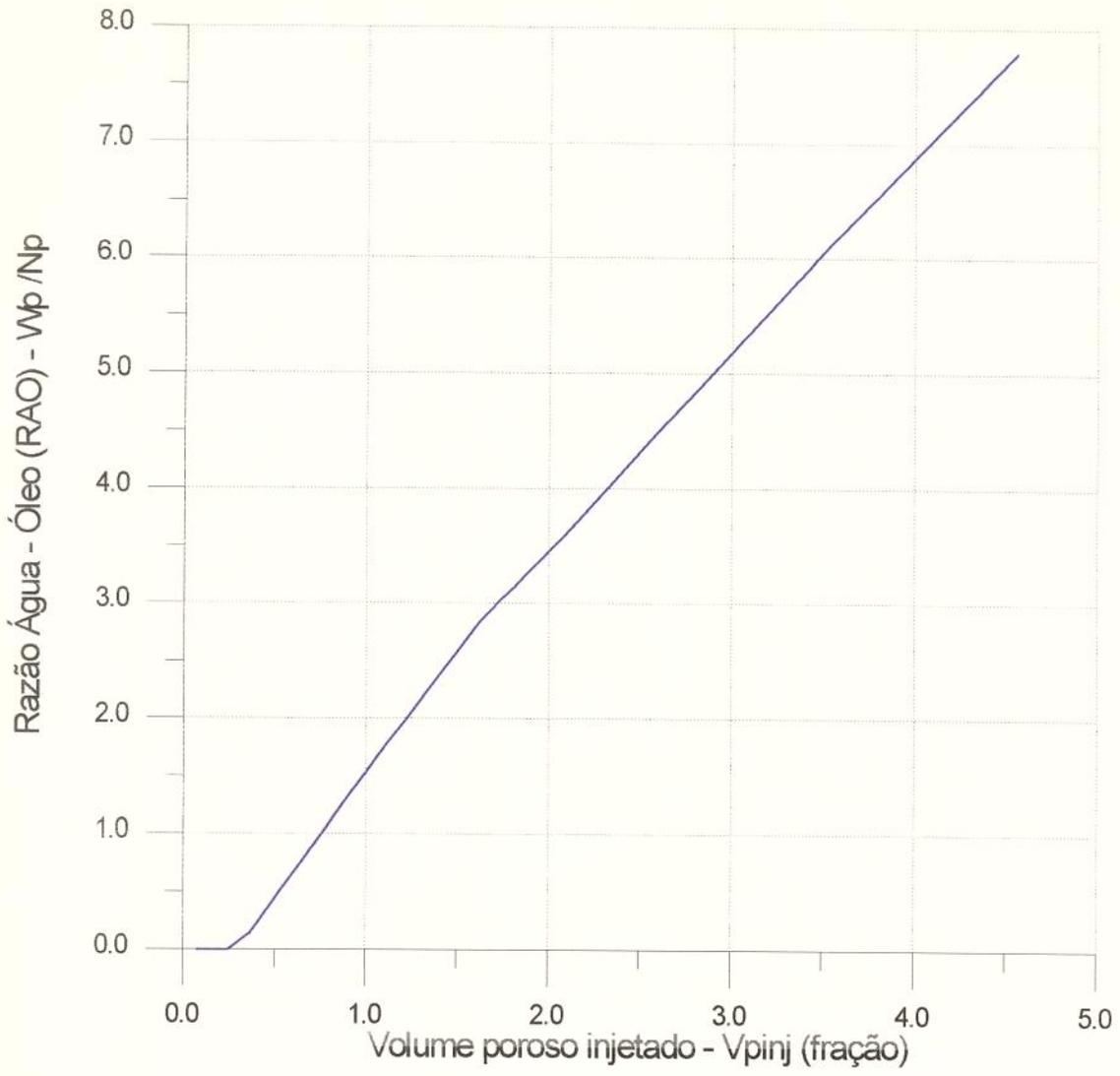


Figura 4.20 - Razão Água - Óleo  
Teste com óleo NUJOL

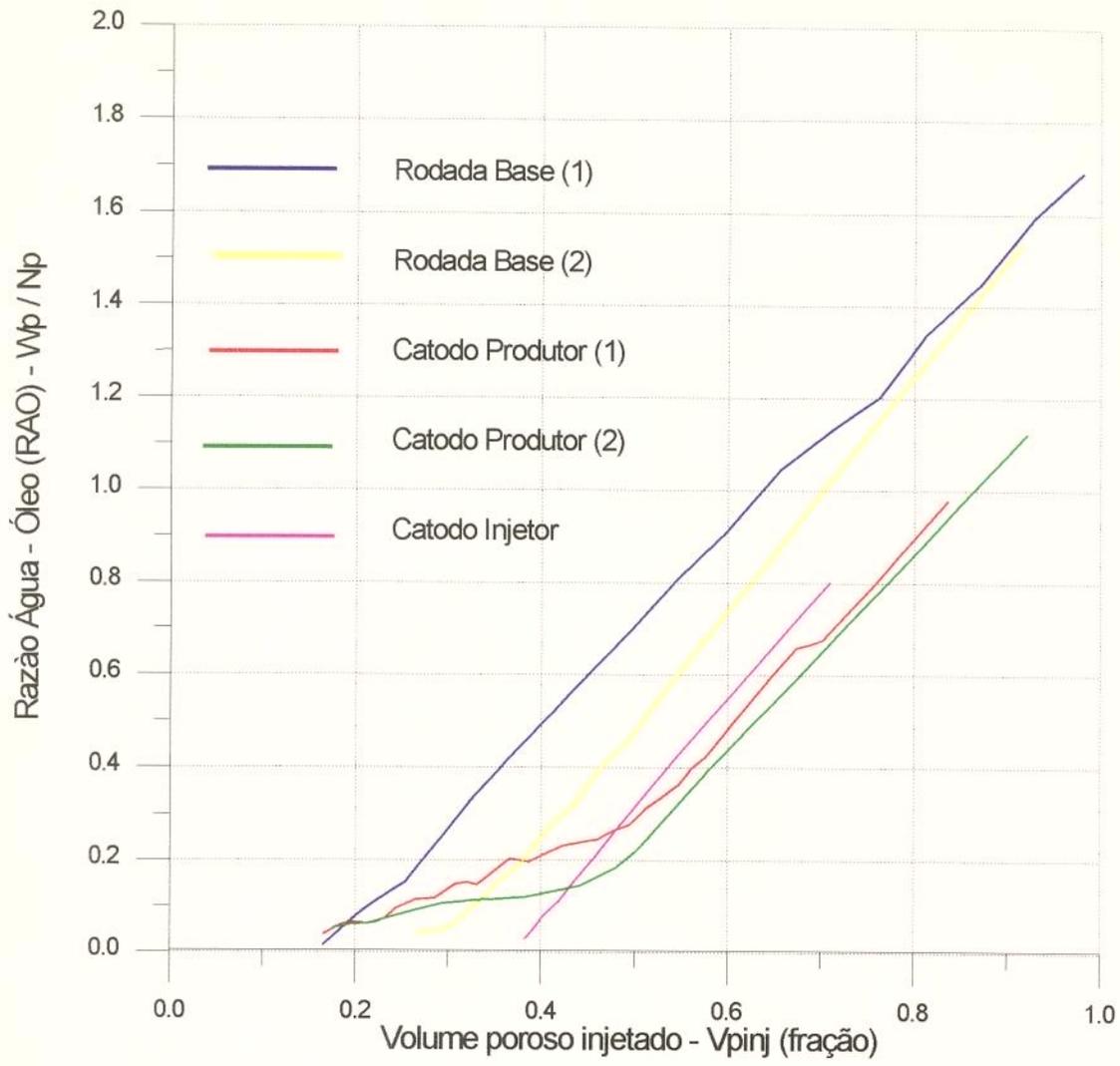


Figura 4.21 - Razão Água - Óleo  
Testes com óleo de Dom João

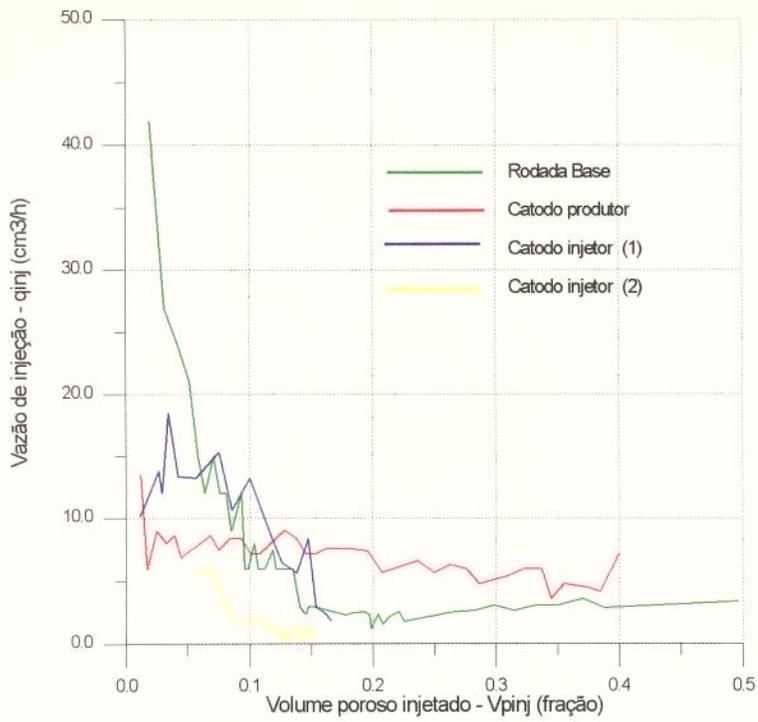


Figura 4.22 - Vazão de injeção  
Testes com querosene

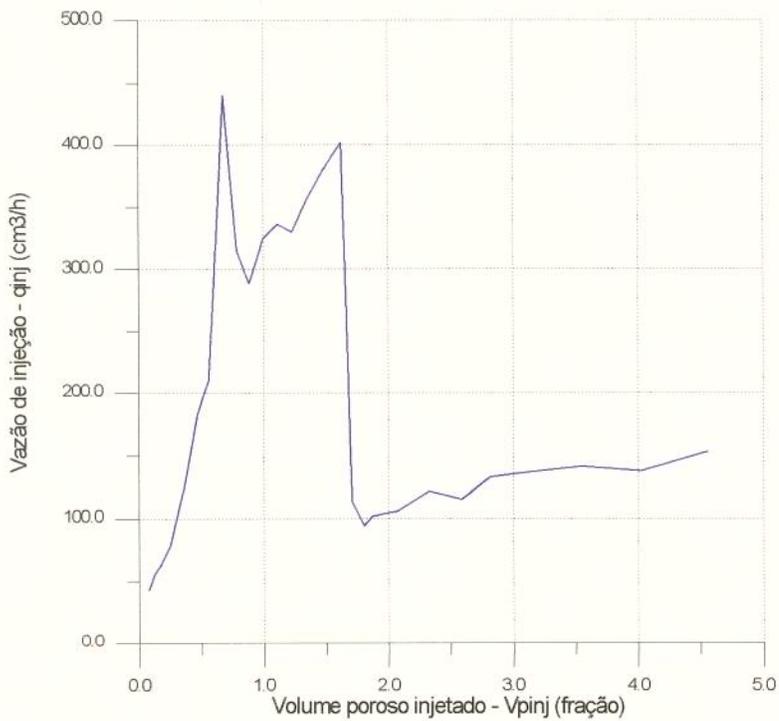


Figura 4.23 - Vazão de injeção  
Teste com óleo NUJOL

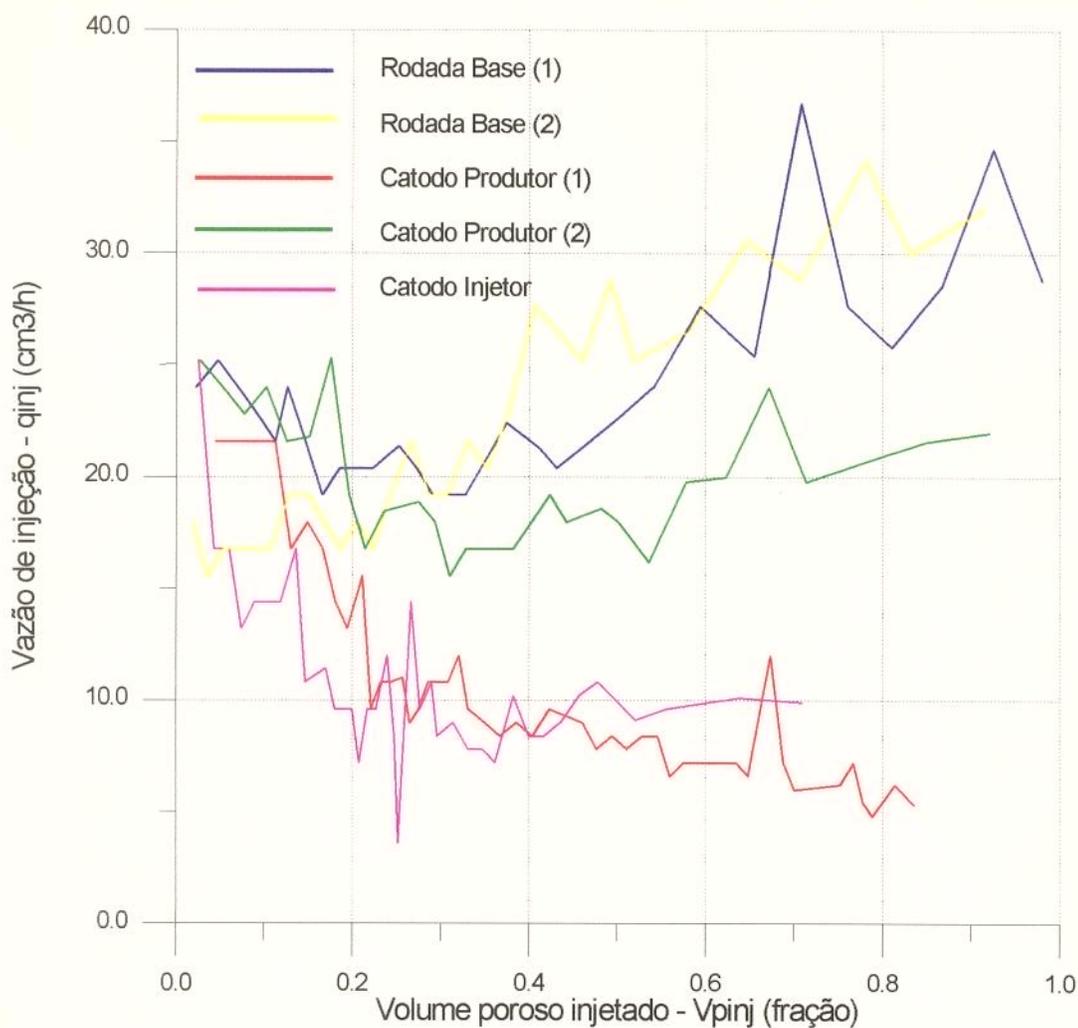


Figura 4.24 - Vazão de injeção  
Testes com óleo de Dom João

Os resultados dos testes de deslocamento foram normalizados (vide Figuras 4.25, 4.26, e 4.27) e foi possível obter as seguintes informações:

- Os testes com querosene não foram conclusivos, provavelmente devido à alta reatividade desse composto, causando interações com os componentes do meio poroso.
- O teste com o óleo NUJOL, apesar de ter sido programado de maneira distinta aos demais, apresentou resultados favoráveis de recuperação.

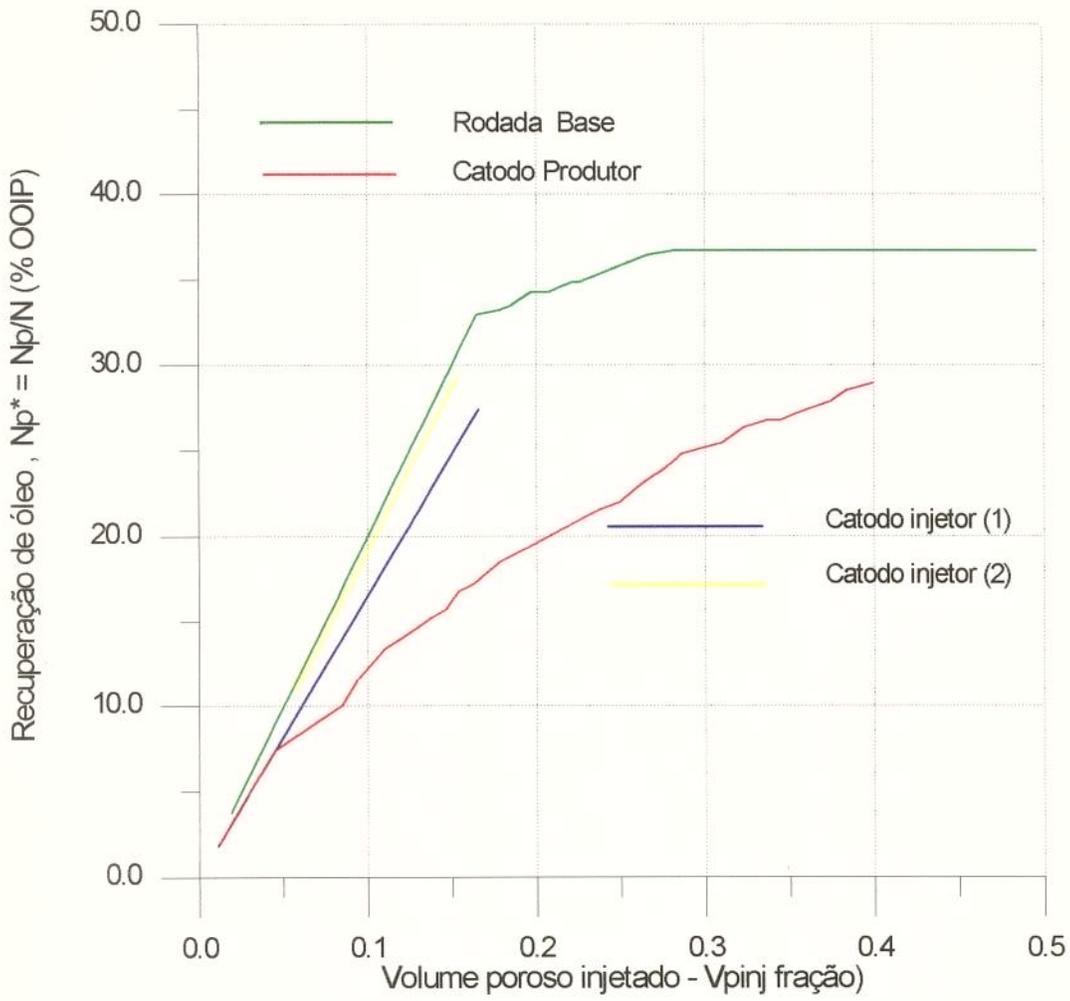


Figura 4.25 - Curvas de Recuperação  
Testes com Querosene

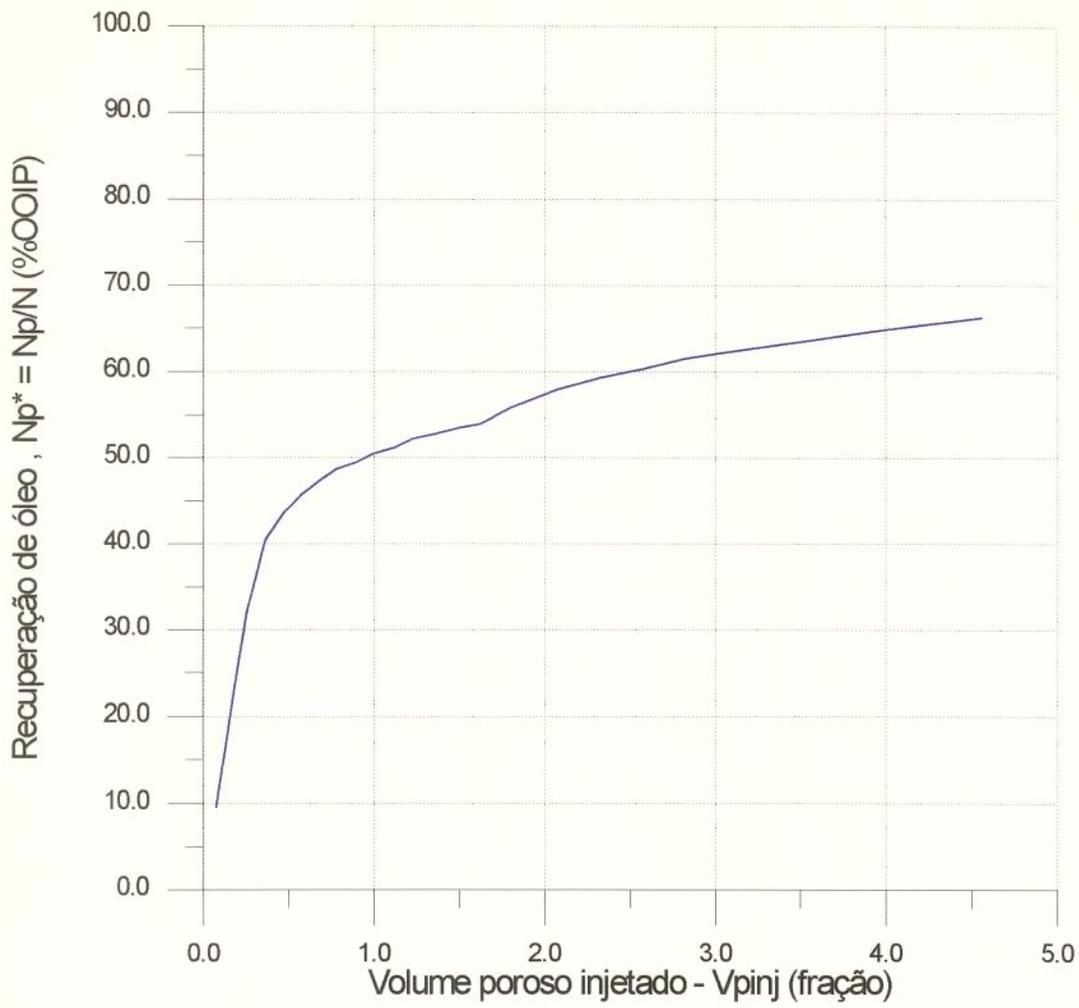


Figura 4.26 - Curva de Recuperação  
Teste com óleo NUJOL

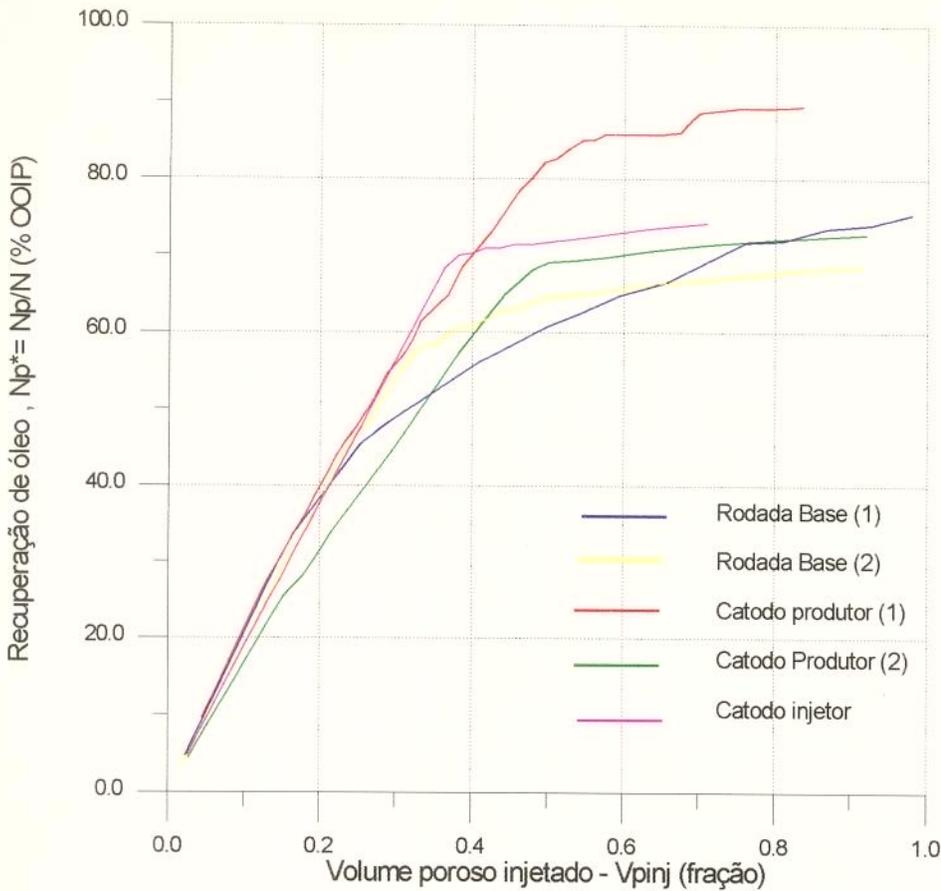


Figura 4.27 - Curvas de Recuperação  
Testes com óleo de Dom João

□ Nos testes com o óleo de Dom João o efeito do campo elétrico, com a passagem da corrente elétrica contínua na configuração 1, em relação à rodada base (observar que a curva da rodada base (1) é a única que foge ao padrão encontrado nas demais curvas), proporcionou, nos testes realizados, aumento no fator de recuperação que variou entre 10 a 20% do volume original de óleo "in place". Nesta mesma configuração ocorreu, sempre, uma antecipação da erupção de água acompanhada em seguida de uma redução da permeabilidade relativa à água, conforme observado no item 4.1. Verifica-se pois que, em sistemas bifásicos não é possível aplicar o mesmo modelo matemático que para sistemas monofásicos. Se fosse possível, deveria ocorrer sempre um aumento da permeabilidade relativa à água, pois:

$$q_w = q_h + q_e \quad (4.1)$$

$$\frac{K \cdot k_{r_w} \cdot A \Delta P}{\mu \omega \cdot L} = \frac{K \cdot k_{r_w} \cdot A \Delta P}{\mu \omega L} + k_e A \frac{\Delta E}{L} \quad (4.2)$$

onde  $k_{r\omega}'$  seria uma permeabilidade relativa resultante.

Então:

$$k_{r\omega}' = k_{r\omega} + \frac{k_e}{k_h} \frac{\Delta E}{\Delta P} \cdot \mu \omega \quad (4.3)$$

que é sempre maior do que a permeabilidade relativa original.

Sendo a eletro-osmose um fenômeno de superfície, em meios porosos saturados com óleo e água, é bastante viável a hipótese de troca de fluidos nas paredes dos grãos.

Logo, em sistemas bifásicos o efeito do campo elétrico não seria computado apenas de maneira aditiva, mas, muito provavelmente, haveria uma alteração nas molhabilidades preferenciais, tornando a rocha mais molhável à água, como pode ser detectado pelas curvas de permeabilidades relativas obtidas dos testes realizados.

Efeitos semelhantes ocorrem como consequência da aplicação de outros métodos de recuperação de petróleo que atuam sobre forças interfaciais, como por exemplo, na injeção alcalina (RAIMONDI, 1981).

As curvas de razão água-óleo (Figura 4.21) mostram que o efeito da passagem da corrente elétrica contínua é sempre favorável com relação a esse parâmetro, causando a sua redução.

Na configuração 2, o aumento do fator de recuperação foi de, no máximo, 10% do óleo original "in place". Foi observado um efeito bastante pronunciado de retenção da fase aquosa fazendo com que a erupção de água só ocorresse quando a amostra já se encontrava próxima à saturação de óleo residual.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

- 1) Pode-se concluir que foi possível isolar o efeito eletro-osmótico do efeito de aquecimento resistivo, porque o aumento máximo de temperatura registrado ( $5^{\circ}\text{C}$ ) não é significativo nem para a expansão térmica de fluidos ( $10^{-3}/^{\circ}\text{C}$  para óleo e  $3 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$  para água) nem para a redução de viscosidade.
- 2) Foi obtida boa repetibilidade na medição dos coeficientes de permeabilidade eletro-osmótica para o sistema estudado, em diversos níveis de saturação. Esses valores encontrados estão situados na faixa de valores reportados na literatura, sendo  $k_e$  proporcional à saturação de água.
- 3) O efeito eletro-osmótico pode ser equivalente ao efeito hidráulico no sistema estudado, como exemplificado no Anexo C, com valores medidos no teste 2, com a amostra TD-06.
- 4) A energia ou potência elétrica dispendida para obtenção de resultados equivalentes ao escoamento por gradiente hidráulico em termos de incremento de vazão é diversas ordens de grandeza maior do que a energia ou potência hidráulica, conforme exemplificado no Anexo D. Logo, o efeito eletro-osmótico por si só provavelmente não seria justificado como um método de recuperação suplementar.
- 5) Em reservatórios de petróleo nos quais o aquecimento dos fluidos e em particular do óleo seja benéfico para a sua recuperação como no caso do óleo do campo de Dom João - parafínico e com ponto de névoa próximo à temperatura do reservatório, o efeito eletro-osmótico representaria uma parcela adicional importante. Como os testes conduzidos com o óleo de Dom João foram realizados a temperaturas sempre acima do ponto de névoa, a elevada recuperação obtida na rodada-base e com produção adicional quando da aplicação de diferença de potencial elétrico, em ambas as configurações testadas, poderia ser justificada pelo raciocínio exposto acima.
- 6) A passagem de corrente elétrica contínua através do meio poroso, para o sistema óleo de Dom João - solução salina resultou em aumento de recuperação da ordem de 15% do óleo original "in place" em ambas as configurações testadas assim como retardamento da erupção da água e

redução nos volumes produzidos de água, efeito este bem mais acentuado na configuração 2 (catodo na extremidade de injeção).

- 7) Foi obtida repetibilidade nos testes feitos em duplicata, o que confere confiabilidade aos resultados obtidos.
- 8) Os resultados obtidos estão restritos à escala de laboratório, logo, poderiam representar o comportamento em torno de um poço, na transposição para escala de campo. Afastando-se do poço, ocorreria atenuação desses efeitos, de maneira análoga à propagação de pressão nos reservatórios de petróleo.  
( Figura 5.1)

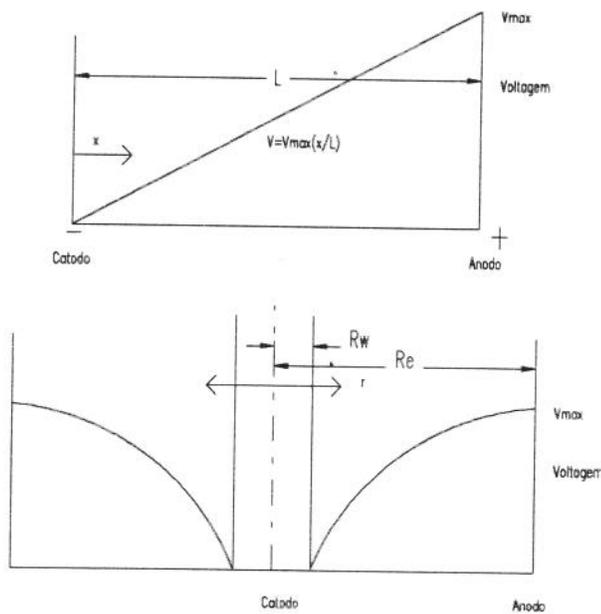


Figura 5.1 - Variação da voltagem com a distância durante a eletro - osmose , para escoamentos unidimensional e radial (segundo MITCHELL, 1976).

- 9) O querosene não pode ser considerado um fluido padrão aceitável. Recomenda-se o uso do óleo de parafina NUJOL como padrão.
- 10) Recomenda-se prosseguir o estudo até aqui desenvolvido, com a realização de uma maior quantidade de testes, nos quais sejam aplicados outros valores de gradiente de potencial nas rodadas com passagem de corrente elétrica contínua, de modo a que seja possível modelar matematicamente o comportamento, principalmente no que se refere às curvas de permeabilidades relativas água-óleo. A pesquisa deve evoluir, ainda, para testes bidimensionais.

## ANEXO A

### — Condutividade hidráulica —

Existem equações que relacionam a condutividade hidráulica ou permeabilidade às propriedades dos meios porosos e dos fluidos que nele permeiam.

O ponto de partida para a derivação dessas relações é a lei de Poiseuille para escoamento em um capilar cilíndrico:

$$v_m = \frac{\gamma R^2}{8\mu} i_h \quad (\text{A.1})$$

Como os canais de fluxo em um meio poroso podem apresentar diversas formas e tamanhos, utiliza-se uma dimensão característica para descrever o tamanho médio. Esta dimensão é o raio hidráulico definido como:

$$R_H = \frac{\text{área da seção transversal aberta do fluxo}}{\text{perímetro molhado}}$$

Para um tubo circular:

$$R_H = \frac{\pi R^2}{2\pi R} \quad (\text{A.2})$$

E então a equação de Poiseuille torna-se:

$$q_{\text{circ}} = \frac{1}{2} \frac{\gamma}{\mu} R_H^2 i_h a \quad (\text{A.3})$$

onde  $a$  é a área transversal do tubo.

Para outras formas de seção transversal, utiliza-se um coeficiente de forma,  $C$ , tal que:

$$q = C \frac{\gamma R_H^2}{\mu} i_h a \quad (\text{A.4})$$

Para um feixe de capilares paralelos com área transversal da seção constante, porém irregular, contribuindo para uma área de seção transversal total A, a área de canais fluxo, é:

$$A_f = S \times \phi \times A \quad (\text{A.5})$$

onde:

S é o grau de saturação  
e  $\phi$  é a porosidade

Logo, a equação (A1.4) torna-se

$$q = C \left( \frac{\gamma}{\mu} \right) R_H^2 \times S \phi i_h A \quad (\text{A.6})$$

Por analogia com a lei de Darcy:

$$\left( \frac{q}{A} = k_h i_h \right) \quad (\text{A.7})$$

obtem-se:

$$k_h = C \left( \frac{\gamma}{\mu} \right) R_H^2 \times S \times \phi \quad (\text{A.8})$$

A permeabilidade absoluta é definida como:

$$K = k_h \left( \frac{\mu}{\gamma} \right) \quad (\text{A.9})$$

e possui unidade de área ( $L^2$ ) enquanto que a condutividade hidráulica possui unidade de velocidade ( $LT^{-1}$ ), pois

$$\begin{aligned} [R_H] &\Rightarrow L \\ [\gamma] &\Rightarrow \frac{F}{L^3} \\ [\mu] &\Rightarrow \frac{F.T}{L^2} \end{aligned}$$

## ANEXO B

### — Composição da solução salina concentrada—

A água residente nos reservatórios R1A do campo de Dom João foi simulada, com base em valores médios encontrados em análises existentes, através da seguinte composição:

- 1.600 ppm\* de radicais sulfato
- 400 ppm de íons magnésio
- 1500 ppm de íons cálcio
- 200 ppm de radicais bicarbonato e
- 33000 ppm de cloreto de sódio

De modo a evitar crescimento bacteriano, acrescentou-se cerca de 100 ppm de formaldeído.

(\*) ppm - partes por milhão

— Medida da massa específica dos fluidos —  
(Óleo de Dom João e Solução Salina 1000 ppm)

Foram utilizados picnômetros de 50 cm<sup>3</sup>.

A) ÓLEO DE DOM JOÃO:

Peso do picnômetro seco: 46,8269g

Peso do picnômetro cheio: 87,3207g

⇓

$$m_{(\text{óleo})} = 40,4938\text{g}$$

⇓

$$\text{massa específica do óleo} = 0,809876\text{g/cm}^3$$

B) SOLUÇÃO SALINA 1000 ppm:

Peso do picnômetro seco: 38,5188g

Peso do picnômetro cheio: 89,1213g

⇓

$$m_{(\text{Sol.Salina})} = 50,6025\text{g}$$

⇓

$$\text{massa específica da solução salina} = 1,01205\text{g/cm}^3$$

## Gráficos de Viscosidade em função de temperatura

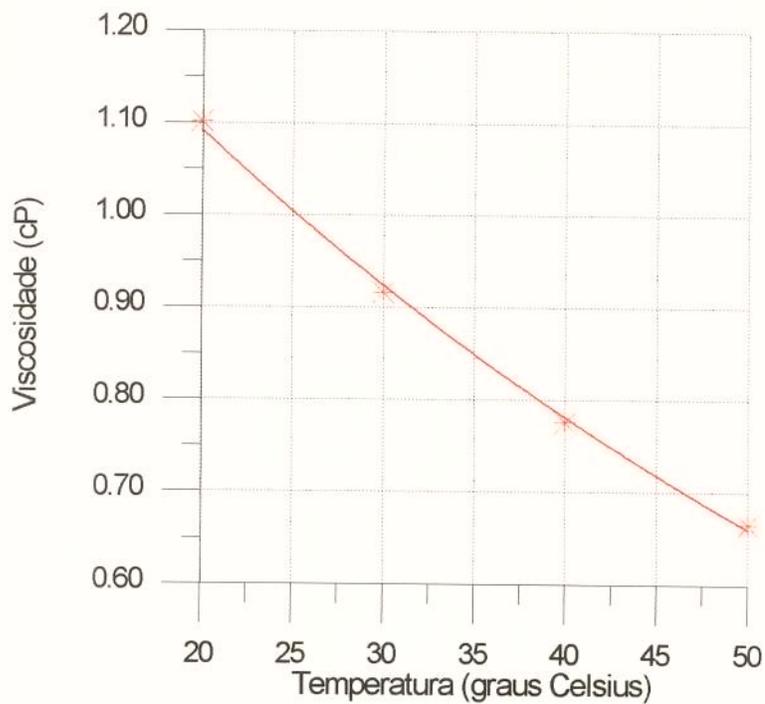


Figura B.1 - Viscosidade do querosene de aviação em função da temperatura

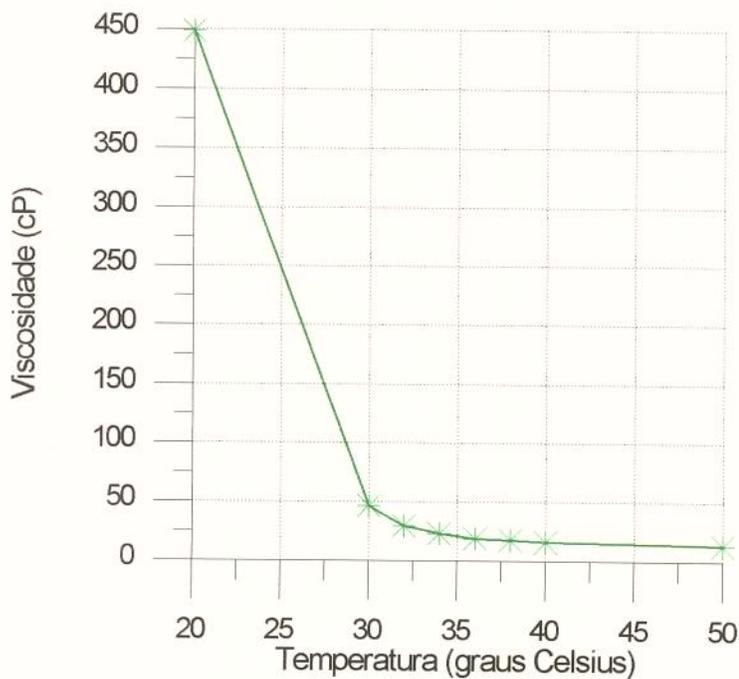


Figura B.2 - Viscosidade do óleo de Dom João em função da temperatura

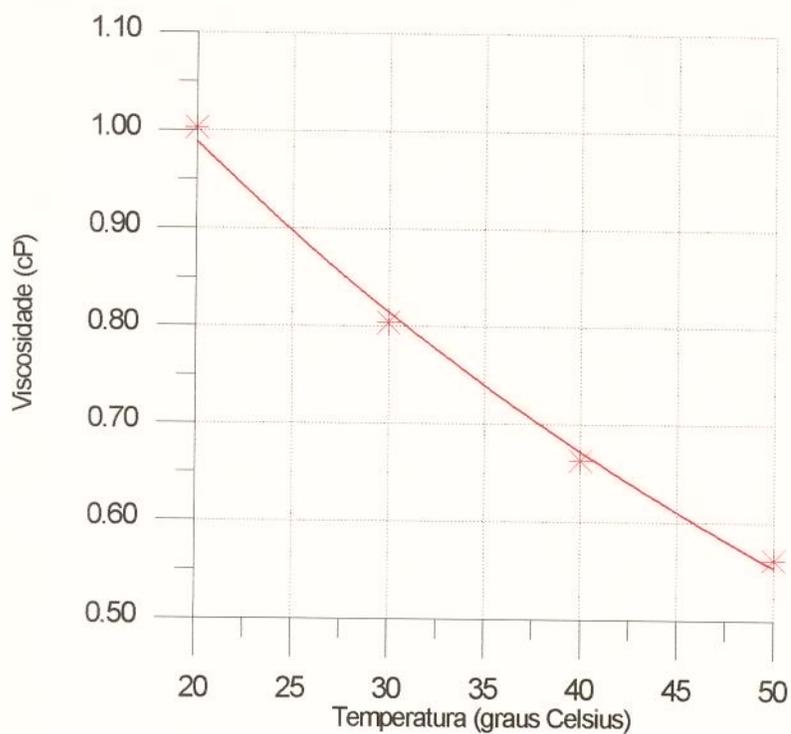


Figura B.3 - Viscosidade da solução salina diluída em função da temperatura

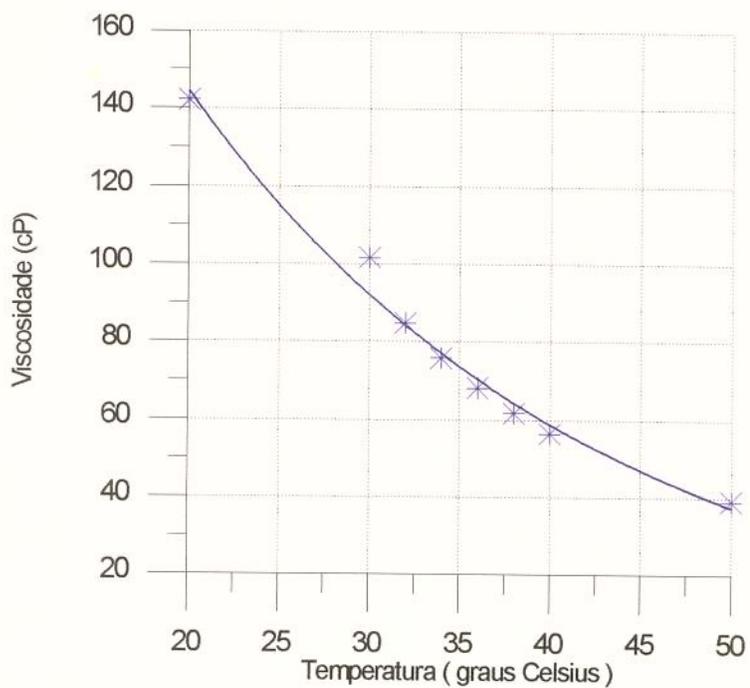


Figura B.4 - Viscosidade do óleo NUJOL em função da temperatura

## ANEXO C

### — Comparação entre os efeitos hidráulico e eletro-osmótico —

A) No teste 2, após deslocamento do querosene por injeção de água, na condição de saturação de óleo residual, foi medido:

Volume produzido: 3,6 ml  
tempo de produção: 101 min  
diferencial de pressão ( $\Delta P$ ): 7,7 psi

Sendo a vazão hidráulica:

$$q_h = k_h A \left( \frac{\Delta P}{L} \right) \Rightarrow k_h = \frac{q_h}{A(\Delta P/L)} \quad (C.1)$$

e a vazão eletro-osmótica:

$$q_e = k_e A \left( \frac{\Delta E}{L} \right) \Rightarrow k_e = \frac{q_e}{A(\Delta E/L)} \quad (C.2)$$

foi calculada a permeabilidade  $K = 2,5 \text{ mD}$  ou a condutividade hidráulica  $k_h = 1,69 \times 10^{-4} \frac{\text{cm}^2}{\text{psi} \cdot \text{s}}$

B) Aplicando potencial elétrico, foi medido:

Volume produzido: 1,2 ml  
tempo de produção: 16 min  
diferencial de pressão ( $\Delta P$ ): 7,7 psi  
potencial elétrico ( $\Delta E$ ): 200 volts

e foi calculada a permeabilidade equivalente, supondo que a vazão obtida fosse devida somente ao gradiente hidráulico:  $K = 5,2 \text{ mD}$ , ou 2,08 vezes o valor anterior.

## ANEXO D

### — Requisitos de energia —

GRAY (1967) e MITCHELL (1976) apresentaram o seguinte procedimento para previsão da quantidade de água transferida por unidade de carga aplicada ( $k_i$ ) em um processo eletro-osmótico:

A vazão eletro - osmótica pode ser então expressa por:

$$q_e = k_i \times I \quad (D.1)$$

A potência  $P$  consumida é dada por:

$$P = \Delta E \cdot I = \frac{\Delta E \cdot q_e}{k_i} \quad (D.2)$$

Para  $\Delta E$  em volts e  $I$  em ampères a potência consumida por unidade de volume escoando é:

$$\frac{P}{q_e} = \frac{\Delta E}{k_i} \times 10^{-3} \text{ kw} \cdot \text{h} \quad (D.3)$$

A relação entre  $k_e$  e  $k_i$  pode ser derivada da seguinte maneira:

$$q_e = K_1 \cdot k_i \cdot I = K_2 k_e \frac{\Delta E}{\Delta L} A \quad (D.4)$$

onde  $K_1$  e  $K_2$  são constantes de unidades.

Logo:

$$k_i = \left(\frac{K_2}{K_1}\right) \left(A \frac{\Delta E}{\Delta L \cdot I}\right) k_e \quad (D.5)$$

como  $\frac{\Delta E}{I}$  é resistência e  $\frac{\Delta L}{\text{resistência} \times A}$  é condutividade específica,  $\sigma$  (mhos/cm) a equação (D.5) torna-se:

$$k_i = \frac{K_2}{K_1} \left( \frac{k_e}{\sigma} \right) = (0,94 \frac{k_e}{\sigma}) \quad (D.6)$$

para  $K_e$  em  $\text{cm}^2/\text{v.s.}$

Nos testes realizados, podem ser comparadas as potências hidráulica ( $P_H$ ) e elétrica ( $P_E$ ) requeridas:

$$P_H = q \times \Delta P \quad (D.7)$$

$$P_E = I \times \Delta E \quad (D.8)$$

Em uma medição no teste 2, obteve-se:

$$P_H = \frac{3,6 \times 10^{-6}}{101 \times 60} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 7 \times \frac{10^5}{14,7} \quad P_a = 2,8 \times 10^{-5} \text{ watts}$$

e

$$P_E = 30 \times 10^{-3} \text{ A} \times 100 \text{ V} = 6 \text{ watts}$$

## 6 NOMENCLATURA

Obs.: entre parênteses - unidades SI

- a - área da seção transversal de um capilar ( $m^2$ )
- A - área total de seção transversal ( $m^2$ )
- Ao - concentração de cargas na parede, na dupla camada elétrica ( $A/m^2$ )
- Af - área de canais abertos ao escoamento ( $m^2$ )
- C - concentração química ( $mol/m^3$ )
- $C_H, C_G$  - capacitância de dois capacitores equivalentes (F)
- $C_T$  - capacitância total
- CTC - capacidade de troca catiônica ( $mol/kg$ )
- D - coeficiente de difusão ( $m^2/s$ )
- D - constante dielétrica ( $C^2s^2/kg/m^3$ )
- E - potencial elétrico (V)
- $\Delta E$  - diferença de potencial elétrico (V)
- F - fator de formação
- $F_E$  - força elétrica (V)
- $F_H$  - força hidráulica (m)
- Fo - constante de Faraday
- H - hidratação dos íons ( $mol/F$ )
- ic - gradiente químico ( $mol/m$ )
- ie - gradiente elétrico (V/m)
- ih - gradiente hidráulico
- it - gradiente térmico (K/m)
- I - corrente elétrica (A)
- $J_i$  - termos de fluxo
- K - permeabilidade absoluta ( $m^2$ )
- $K^{-1}$  - espessura da dupla camada elétrica (m)
- $k_e$  - coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica ( $m^2/V.S$ )
- $k_h$  - condutividade hidráulica (m/s)
- $k_i$  - vazão de água transferida, por unidade de carga elétrica ( $m^3/s.A$ )
- $k_r$  - permeabilidade relativa
- $k_t$  - condutividade térmica (W/m.K)
- L - comprimento (m)
- $L_i$  - constantes de proporcionalidade
- $L_{ij}$  - coeficientes de acoplamento
- N - número de capilares

$N_+, N$	- números de moles de água de hidratação (mol)
$P$	- pressão (Pa)
$\Delta P$	- diferença de pressão (Pa)
$P_E$	- potência elétrica (W)
$P_H$	- potência hidráulica (W)
$q$	- vazão volumétrica ( $m^3/s$ )
$r$	- raio de um capilar (m)
$R$	- raio do tubo, na lei de Poiseuille (m)
$R_H$	- raio hidráulico (m)
$S$	- grau de saturação
$S_{wi}$	- saturação de água irreduzível
$S_{or}$	- saturação de óleo residual
$t_+, t_-$	- números de transporte
$v$	- velocidade de escoamento (m/s)
$v_m$	- velocidade média de escoamento (m/s)
$\frac{v}{\delta}$	- gradiente de velocidade entre a parede e o centro das cargas positivas, na dupla camada elétrica ( $s^{-1}$ )
$\omega$	- transporte de água (mol/F)
$x$	- distância (m)
$X_j$	- gradientes
$X_j$	- gradientes
$X_{ij}$	- coeficientes de fricção

### Letras gregas:

$\gamma$	- peso específico de um fluido ( $N/m^3$ )
$\delta$	- distância entre os íons e a superfície na dupla camada elétrica (m)
$\mu$	- viscosidade de um fluido (Pa.s)
$\xi$	- potencial zeta (V)
$\sigma$	- densidade de cargas superficiais na dupla camada elétrica ( $A/m^2$ )
$\sigma_e$	- condutividade elétrica (S/m)
$\phi$	- porosidade
$\Psi$	- potencial, modelo de Gouy-Chapman para dupla camada elétrica (V)
$\Psi_0$	- potencial do plano de Helmholtz (V)
$\Omega$	- fluxo eletro-osmótico (mol/F)

## Subcritos:

- c, C - químico
- e, E - elétrico
- h, H - hidráulico
- t, T - térmico
- ω - relativo a água

## 7 BIBLIOGRAFIA

- ADAMSON, L.G. "Application of Electrokinetic Phenomena in : Dewatering, Consolidation and Stabilization of Soils and Weak Rocks in Civil and Petroleum Engineering, and Augmenting Reservoir Energy During Petroleum Production, PhD dissertation, U. of Southern California, Los Angeles, 406 pp., 1966.
- AGGOUR, M.A. & MUHAMMADAIN, A.M. "Investigation of Waterflooding under the Effect of Electrical Potential Gradient", Journal of Petroleum Science and Engineering , 7 , 319-322, 1992.
- AGGOUR, M.A. & TCHELEPI, H.Y. AL-YOUSEF "Effect of electro-osmosis on relative permeabilities of sandstones", Journal of Petroleum Science and Engineering, 11, 91-102, 1994.
- AMBA, S.A. : "Use of Direct Electrical Current for Increasing the Flow Rate of Reservoir Fluids During Petroleum Recovery", PhD dissertation, U. of Southern California, Los Angeles, 255 pp., 1963.
- AMBA, S.A. & CHILINGAR, G.V. & BEESON, C.M. "Use of Direct Electrical Current for Increasing the Flow Rate of Reservoir Fluids During Petroleum Recovery", Journal of Canadian Petroleum Technology, 3(1), 8-14, 1964.
- ANJOS, S.M.C. & CARVALHO, C.R.F. "Mineralogia de argilas de amostras de areia sujeitas a corrente elétrica", Comunicação Técnica PETROBRÁS / CENPES/ /DIGER nº 068/94, 1994.
- BALLOU, E.V. "Electro-osmotic Flow in Homoionic Kaolinite", Journal of Colloid Science, 10, 450-460, 1955.
- BOCKRIS, J. & BONCIOCAT, N. & GUTMAN, F. An Introduction to Electrochemical Science, London, Wykeham, 1974, 133p.
- BRUELL, C.J. & SEGALL, B.A. & WALSH, A.T. "Electro-osmotic Removal of Gasoline Hydrocarbons and TCE from Clay", Journal of Environmental Engineering, ASCE, 118(1), 68-83, 1992.

- CASAGRANDE, L. "Die entwässerung feinkoerniger boeden", Die Strasse n<sup>os</sup> 19-20, 1941.
- CASAGRANDE, L. "Electro-osmotic Stabilization of Soils", Journal of the Boston Society of Civil Engineers, **39(1)**, 51-83, 1952.
- CASAGRANDE, L. "A Review of Past and Current Work on Electro-osmotic Stabilization of Soils", Harvard Soil Mechanics Series, n<sup>o</sup> 45, Harvard University, Cambridge, Massachussets, 1959
- CHILINGAR, G.V. & EL-NASSIR, A. & STEVENS, R.G.: "Effect of Direct Electrical Current on Permeability of Sandstone Cores, Journal of Petroleum Technology", 830-836, 1970
- COIMBRA, A.M. DPE, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo - Comunicação Pessoal, 1994.
- FETZER, C. A. "Electro-osmotic Stabilization of West Branch Dam", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Divisions, (SM 4), 85-106, 1967.
- FLEUREAU, J.M. "Influence d'un Champ Thermique ou Elèctrique sur les Phénomènes d'Interaction Solide-Liquide dans les Milieux Poreux", Thèse presente à L'École Centrale des Arts et Manufactures pour Obtenir le titre de Docteur - Ingénieur, 381 p., 1979.
- GRAY, D.H. "Coupled Flow Phenomena in Clay-Water Systems", Thesis Presented to the University of California at Berkeley, California in Partial Fullfilment of the Requeriments for the degree of Doctor of Philosophy.
- GRAY, D.H. & MITCHELL, J.K.: "Fundamental aspects of electro-osmosis in soils", Journal of Soil Mech. Fdns. Div. Am. Soc. Civ. Engrs. , **93 (SM6)**, 209-236, 1967.
- GRIGOROV, O.N. & THIKHOMOLOVA, K.P. "Effect of Electro-osmosis on the Displacement of Kerosene and Petroleum Oil from a Porous Medium by Water", Kolloidnyy Zhurnal, **27(3)**, 334-337, 1965.

- HAMED, J. & ACAR, Y.B. "Pb(II) Removal from Kaolinite by Electrokinetics", *Journal of Geotechnical Engineering*, **117(2)**, 1991.
- HELMHOLTZ, VON, H.L.F. "Studies of Electric Boundary Layers", *Ann. Physik*, **3(7)**, p.337, 1879; trans. by P.E. Bocque, University of Michigan, *Engr. Res. Bull.*, **33**, 5-47.
- JOHNSON, E.F., BOSSLER, D.P. & NAUMANN, V.O. "Calculation of relative permeability from displacement experiments", *Trans AIME*, **216**, 370-372, 1959.
- JOCHIMEK, M.R. "Evolução diagenética nos arenitos do campo de Dom João (Bahia) e suas conseqüências nas propriedades armazenadoras daqueles reservatórios", PETROBRÁS, CENPES, Rio de Janeiro, 1981.
- JOCHIMEK, M.R. "Mineralogia de argilas", para o Curso de Mineralogia de Argilas, PETROBRÁS, CENPES, 1987.
- LOCKHART, N.C. "Electroosmotic Dewatering of Clays.I. Influence of Voltage", *Colloids and Surfaces*, **6**, 229-238, 1983.
- LOCKHART, N.C. "Electroosmotic Dewatering of Clays.II. Influence of Salt, Acid and Flocculants", *Colloids and Surfaces*, **6**, 239-251, 1983.
- LOCKHART, N.C. "Electroosmotic Dewatering of Clays.III. Influence of Clay Type, Exchangeable Cations and Electrode Materials", *Colloids and Surfaces*, **6**, 253-269, 1983.
- MACHADO, J.C.V. "Comportamento dos argilominerais", para o curso de Mineralogia de Argilas, PETROBRÁS, CENPES, 1987.
- MITCHELL, J.K. *Fundamentals of Soil Behaviour*, New York: Wiley, 1976.
- MITCHELL, J.K. "Conduction phenomena: from theory to geotechnical practice", *Geotechnique*, **41**, nº 3, 299-340, 1991.

- NETTO, A.S.T. Manual de Sedimentologia, Salvador, PETROBRÁS/SEPES/  
/DIVEN. Setor de Ensino na Bahia, 1980, 194 p.
- OLSEN, H.W. "Hydraulic flow through saturated clays", Sc. D. Thesis, M. I. T.,  
Cambridge, Mass., 1961.
- OLSEN, H.W. "Simultaneous Flow of Liquid and Charge in Saturated  
Kaolinite", Soil Science Society of America Proceedings, **33(3)**, 339-344, 1969.
- OLSEN, H.W. "Liquid Movement Through Kaolinite under Hydraulic, Electric  
and Osmotic Gradients", American Association Engng. Geol. Bull.,  
**56(10)**, 2022-2028, 1972.
- ONSAGER, L. "Reciprocal relations in irreversible processes", Physical Review,  
vol. 37, 405-426, vol. 38, 2265-2279, 1931.
- RAIMONDI, P. & CROOKSTON, R.B. "An evaluation of the Dom João field  
for alkaline waterflooding", Gulf Research & Development Company  
Consultoria para PETROBRÁS, 1982
- REUSS, F. "Memories Soc. Imp. Naturalistes", **2**, p.327, Moscow, 1809.
- RODRIGUES, C.R.O. "Argilominerais na Evolução Diagenética dos Arenitos da  
Formação Sergi, Jurássico, Bacia do Recôncavo, Brasil", Tese de Mestrado,  
Universidade Federal de Ouro Preto/MG, Brasil, 211 pp., 1990.
- SAXEN, U. "Electrokinetic Potentials", Textbook of Physical Chemistry (S.  
Glasstone, Ed.), Van Nostrand, New York, Chapter XIV, p. 1225.
- SCHMID, G. "Zur Elektrochemie Feinporiger Kapillarsystems", Zhurnal fur  
Elektrochemie, Vol. 54, p. 425, Vol. 55, p. 684, 1950, 1951.
- SEGALL, B.A. & BRUELL, C.J. "Electroosmotic Contaminant Removal  
Processes", Journal of Environmental Engineering, ASCE, **118(1)**, 84-100,  
1992.

SMOLUCHOWSKI, VON, M. "Electric Endosmosis and Streaming Current",  
Handbuch der Elektrizitat und der Magnetismus II", 2, 366-428, 1921; trans.  
by P.E. Bocque, University of Michigan, Engr. Res. Bull., 33, 47-158.

SOUTHAMPTON Electrochemistry Group: Instrumental Methods in  
Electrochemistry, Chichester, E. Horwood, 1985, 443 p.

SPIEGLER, K.S. "Transport Processes in Ionic Membranes", Transactions of the  
Faraday Society, Vol. 54, 1408-1428, 1958.

THIKHOMOLOVA, K.P. "Effect of Electroosmosis on Displacement of  
Kerosene from a Porous Medium", Kholloydnyy Zhurnal, 28(4), 513-517,  
1964.

WIEDEMANN, G. Ann. Physik, 87, p.321, 1852.

WINTERKORN, H.F. "Fundamental Similarity between Electro-osmosis and  
Thermo-osmosis and Thermo-osmotic Phenomena", Proc. Highw. Res. Board,  
27, 443-455, 1947.

WINTERKORN, H.F. "Water Movement through Porous Hydrophylic Systems  
under Capillary, Electric and Thermal Potentials", American Society for  
Testing and Materials Special Technical Publication 163, 27-35, 1955.