



Eudes Siqueira Muniz

**Desenvolvimento de equipamento e
metodologia de testes para avaliação da
interação folhelho-fluido de perfuração**

TESE DE DOUTORADO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

Rio de Janeiro

Junho de 2003



Eudes Siqueira Muniz

**Desenvolvimento de equipamento e metodologia de testes
para avaliação da interação folhelho-fluido de perfuração**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Sérgio A. B. da Fontoura

Rio de Janeiro

Junho de 2003



Eudes Siqueira Muniz

Desenvolvimento de Equipamento e Metodologia de Testes para Avaliação da Interação Folhelho-Fluido de Perfuração

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Sérgio A. B. da Fontoura

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Dr. Mauro Bloch

CENPES/ Petrobras

Dra. Rosana Fátima T. Lomba

CENPES/ Petrobras

Prof. Alberto de Sampaio F. J. Sayão

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Tácio Mauro P. de Campos

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Ney Augusto Dumont

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 04 de Junho de 2003

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Eudes Siqueira Muniz

Graduou-se em Engenharia de Minas na UFOP (Universidade Federal de Ouro Preto) em 1995. Em 1998 defendeu a dissertação de mestrado intitulada “Nova Metodologia de Ensaaios Triaxiais de Folhelhos” junto ao Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio. Desde então vem se dedicando ao estudo dos problemas de instabilidade em poços de petróleo provocados por interações físico-químicas entre o fluido de perfuração e a rocha perfurada.

Ficha Catalográfica

Muniz, Eudes Siqueira

Desenvolvimento de equipamento e metodologia de testes para avaliação da interação folhelho-fluido de perfuração / Eudes Siqueira Muniz; orientador: Sérgio Augusto B. da Fontoura. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2003.

[18]. , 175 f. : il. ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Folhelhos. 3. Difusão. 4. Interação rocha- fluido. 5. Estabilidade de poços de petróleo. 6. Ensaios de laboratório. I. Fontoura, Sérgio Augusto B. da. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD : 624

A minha mãe, Ana Maria,
exemplo de sabedoria e sinceridade

Agradecimentos

Ao CNPq, ANP e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Ao meu orientador Sérgio A. B. da Fontoura pela paciência, confiança e respeito profissional depositados em minha pessoa para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil pelos ensinamentos e total apoio no decorrer deste trabalho. Agradeço especialmente aos funcionários do Laboratório de Geotecnia, William, Sr. José, Amauri, Josué e Rosa, pela ajuda e atenção dada nestes 4 anos de pesquisa.

Aos colegas do GTEP e especialmente à equipe do Laboratório de Interação Rocha-Fluido, Fernanda Carvalho, Marcelo Malta, Caetano, Olga Cecília, Claudio Rabe, Luiz Guilherme, Ricardo e Michele, que participaram direta ou indiretamente na realização deste trabalho.

À minha tia Maria Geralda e família pelo apoio dado a meu irmão que posteriormente pode me ajudar a concluir o segundo grau.

À minha família pela atenção, carinho e incentivo em todos os momentos da minha vida. Em especial à minha esposa, Cleide Jeane, pela paciência em ouvir meus problemas e conquistas, e por me impedir de trabalhar todos os finais de semana, afinal existe vida durante a tese.

Aos colegas da PUC-Rio e aos ex-companheiros de moradia pela amizade e salutar convívio de gratas recordações.

Aos professores que participaram da Comissão Examinadora.

Resumo

Muniz, Eudes Siqueira; Fontoura, Sérgio Augusto B. **Desenvolvimento de equipamento e metodologia de testes para avaliação da interação folhelho-fluido de perfuração**. Rio de Janeiro, 2003. 175 p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A perfuração de poços de petróleo através de folhelhos, que se constituem na maioria das rochas da coluna estratigráfica, pode apresentar problemas de instabilidade devido às interações físico-químicas entre os fluidos de perfuração e estas rochas. Os custos associados à solução destes problemas são muito altos e dependendo da intensidade destes problemas, poços podem ser perdidos.

Nesta tese, um novo equipamento, capaz de reaplicar parte das tensões que estão atuando na amostra de rocha, foi desenvolvido. Uma metodologia de testes para avaliar os mecanismos de interação rocha-fluido e para determinar os parâmetros de transporte de massa, necessários para análises de estabilidade de poços, é proposta. Especificamente, parâmetros que descrevem o transporte de água e íons devido a gradientes hidráulicos e químicos são determinados. O conhecimento destes parâmetros contribui para compreender a eficiência do fluido de perfuração no controle de instabilidades durante a perfuração.

Testes realizados em dois folhelhos de plataformas “offshore” usando diferentes fluidos demonstraram a eficiência do equipamento e da metodologia de testes. Os parâmetros de transporte obtidos são consistentes com valores obtidos em outros trabalhos.

Palavras-chave

Folhelhos; Interação rocha-fluido; Estabilidade de poços de petróleo; Difusão; Ensaios de laboratório.

Abstract

Muniz, Eudes Siqueira; Fontoura, Sérgio Augusto B. (Advisor). **Development of Equipment and Testing Methodology to Evaluate Rock-Drilling Fluid Interaction**. Rio de Janeiro, 2003, 175 p. DSc. Thesis. Department of Civil Engineering, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The drilling of oil wells through shales, which constitute the majority of rocks in the stratigraphic column, may present instability problems due to physico-chemicals interactions between the drilling fluids and these rocks. The costs associated to the solution of these problems are very high and, depending upon the intensity of these problems, wells can be lost.

In this thesis, a new equipment was developed which is capable of reapplying part of the stresses that were acting upon the rock sample. A testing methodology to evaluate rock-fluid interaction mechanisms and to determine the mass transport parameters, needed for wellbore stability analyses, is proposed. Specifically, parameters that describe the transport of water and ions due to hydraulic and chemicals gradients are determined. The knowledge about these parameters is instrumental to understand the efficiency of the drilling fluid in controlling instabilities during drilling.

Tests carried out in two shales from offshore platforms using different fluids demonstrated the efficiency of equipment and of the testing methodology. The transport parameters obtained are consistent with values obtained elsewhere.

Keywords

Shales; rock-fluid interactions; wellbore stability; diffusion; Laboratory tests.

Sumário

1 Introdução

1.1. Motivação	19
1.2. Objetivo	20
1.3. Escopo	20

2 Revisão Bibliográfica

2.1. Considerações Gerais	22
2.1.1. Enceramento de Brocas ou “Bit-Balling”	22
2.1.2. Dispersão de Cascalhos	23
2.1.3. Rupturas por Compressão ou Tração	23
2.2. Estudos nesta Linha de Pesquisa	24
2.2.1. Equipamentos e Resultados Apresentados na Literatura	29
2.3. Considerações Finais	41

3 Desenvolvimento do Equipamento e da Metodologia de Ensaios

3.1. Introdução	43
3.2. Fase I (Outubro 1998 – Janeiro 1999)	43
3.2.1. Ensaios Realizados	45
3.3. Fase II (Fevereiro 1999 – Dezembro 1999)	48
3.3.1. Ensaios Preliminares	49
3.3.2. Ensaios em Folhelhos	51
3.3.3. Conclusões	53
3.4. Fase III – (Janeiro 2000 – Outubro 2000)	53
3.4.1. Ensaios de Difusão por Gradiente Hidráulico	55
3.4.2. Conclusões	57
3.5. Fase IV – (Outubro 2000 – Junho 2001)	58
3.5.1. Ensaio de Difusão em Folhelho – CP26	59
3.5.2. Conclusões	63
3.6. Fase V – (Junho 2001 – Novembro 2001)	63
3.6.1. Ensaios em Folhelhos	64
3.6.1.1. Ensaio no Corpo de Prova 27	64
3.6.1.2. Ensaio no Corpo de Prova 28	68
3.6.1.3. Ensaio no Corpo de Prova 29	71
3.6.1.4. Ensaio no Corpo de Prova 14	74
3.6.2. Ensaios em Membrana Osmótica	75
3.7. Conclusões	79

4 Metodologia de Ensaio e Análises

4.1. Comentários Gerais	80
4.2. Preparação do Sistema	80
4.3. Etapa de Preparação do Corpo de Prova	83
4.4. Etapa de Saturação do Corpo de Prova	84
4.5. Etapa de Consolidação do Corpo de Prova	88
4.6. Etapa de Difusão de Pressão do Corpo de Prova	88
4.7. Etapa de Difusão de Íons do Corpo de Prova	89
4.8. Análise dos Resultados Utilizando o Programa Fporo	91
4.9. Conclusões	93

5 Medidas de Concentração

5.1. Comentários Gerais	95
5.2. Medidas de Concentração Utilizando o Condutivímetro	96
5.2.1. Equipamento e Metodologia Utilizada	96
5.2.2. Ensaio de Calibração	97
5.3. Medidas de Concentração Utilizando a Fibra Óptica	98
5.3.1. Equipamento e Metodologia Utilizada	98
5.3.2. Ensaio de Calibração	100
5.4. Ensaio Realizados	104
5.4.1. Ensaio com Cloreto de Cálcio (CaCl_2)	104
5.4.2. Ensaio com Formiato de Sódio (NaCOOH)	111
5.5. Reavaliação da Fibra Óptica e do Condutivímetro	115
5.6. Conclusões	122

6 Resultados e Análises

6.1. Comentários Gerais	123
6.2. Descrição dos Folhelhos Estudados	123
6.3. Ensaio de Bancada ou Sorção	127
6.3.1. Metodologia do Ensaio	128
6.3.2. Análise dos Resultados	129
6.4. Ensaio em Folhelhos na Célula de Difusão	135
6.4.1. Dados Iniciais dos Corpos de Prova	135
6.4.2. Fase de Saturação	138
6.4.3. Fase de Adensamento	141
6.4.4. Fase de Difusão de Pressão	142
6.4.5. Fase de Difusão de Íons	150
6.4.5.1. Análise do Coeficiente de Reflexão (Eficiência de Membrana)	158
6.4.6. Análises Após a Retirada do Corpo de Prova	160
6.4.6.1. Análise do Corpo de Prova	160

6.4.6.2. Análise do Fluido do Reservatório Inferior	161
6.5. Conclusões	164
7 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	
7.1. Conclusões	166
7.2. Sugestões para Trabalhos Futuros	167
Referências Bibliográficas	171

Lista de figuras

Figura 2. 1 – (a) Membrana semi-permeável perfeita (b) Membrana semi-permeável imperfeita (modificado de Mikulecky, 1997)	27
Figura 2. 2 – Esquema do equipamento utilizado por Ballard <i>et al.</i> (1992)	30
Figura 2. 3 – Esquema do equipamento utilizado por Lomba (1998)	31
Figura 2. 4 – Esquema do equipamento utilizado por van Oort (1994)	32
Figura 2. 5 – Ensaio de transmissão de pressão para fluido base óleo (van Oort, 1994)	33
Figura 2. 6 – Esquema do equipamento de transmissão de pressão e ensaios de osmose (modificado de van Oort <i>et al.</i> , 1996)	34
Figura 2. 7 – Ensaio de fluxo osmótico (van Oort, 1994)	35
Figura 2. 8 – Esquema da célula DSC (modificado de Simpson & Walker, 1995)	36
Figura 2. 9 – Célula para ensaios de potencial químico (modificado de Tan <i>et al.</i> 1996)	39
Figura 2. 10 – Esquema do equipamento utilizado por Ewy & Stankovich (2002)	40
Figura 3. 1 – Esquema do Kazerímetro	44
Figura 3. 2 – (a) Vista do Kazerímetro e o circuito de válvulas utilizado; (b) Detalhe do Kazerímetro com o corpo de prova devidamente preparado para o ensaio	44
Figura 3. 3 – Difusão de pressão em solo residual, 1º estágio	45
Figura 3. 4 – Difusão de pressão em solo residual, 2º estágio	46
Figura 3. 5 – Configuração do sistema utilizado para avaliar o efeito osmótico	47
Figura 3. 6 – Fase de difusão de pressão e íons em solo residual	47
Figura 3. 7 – Esquema do equipamento desenvolvido	48
Figura 3. 8 – (a) Célula de difusão, (b) Corpo de prova de solo residual	50
Figura 3. 9 – Difusão de pressão em solo residual – Fase II	50
Figura 3. 10 – Variação das pressões no folhelho da Noruega (N)	51
Figura 3. 11 – Variação das pressões no ensaio de difusão no folhelho do Brasil (B)	52
Figura 3. 12 – Esquema das linhas de circulação e acessórios utilizados na fase III	54
Figura 3. 13 – Variação das pressões na fase de difusão de pressão – CP09	56
Figura 3. 14 – Variação das pressões na fase de difusão de pressão – CP10	57
Figura 3. 15 – Aplicador de pressão/volume – GDS	58
Figura 3. 16 – (a) Foto da interface construída; (b) Bellofram utilizado	59
Figura 3. 17 – Corpo de prova 26 após o ensaio de difusão	60
Figura 3. 18 – Variação das pressões durante a fase de difusão de pressão – CP26	61
Figura 3. 19 – Variação das pressões durante a fase de difusão de íons – CP26	62
Figura 3. 20 – (a) – Detalhe das molas feitas com os tubos de aço inoxidável (b) – Detalhe da nova configuração com engates rápidos	65
Figura 3. 21 – Retirada do CP27 da célula de difusão	66
Figura 3. 22 – Variação das pressões durante a fase de difusão de pressão – CP27	67

Figura 3. 23 – Variação das pressões e deslocamento desde o início da fase de difusão de pressão – CP27	68
Figura 3. 24 – Detalhe do novo “cap” maciço e das pedras porosas de plástico	69
Figura 3. 25 – Variação da pressão axial com a temperatura	70
Figura 3. 26 – Variação das pressões desde a fase de difusão de pressão – CP28	71
Figura 3. 27 – Variação das pressões e força axial na fase de saturação (CP29)	72
Figura 3. 28 – Variação das pressões nas fases de difusão de pressão e íons – CP29	74
Figura 3. 29 – Variação das pressões nas fases de difusão de pressão e íons (CP14)	75
Figura 3. 30 – Bexiga de celofane presa à pipeta	76
Figura 3. 31 – A) Bexiga de celofane após a imersão B) 25 minutos após a imersão	76
Figura 3. 32 – Corpo de prova de celofane utilizado nos ensaios	77
Figura 3. 33 – Ensaio de difusão no corpo de prova de celofane	78
Figura 3. 34 – Fase de difusão de íons do corpo de prova de celofane	79
Figura 4. 1 – Circuito de contrapressão	82
Figura 4. 2 – Circuito de pressão confinante e axial	82
Figura 4. 3 – Fotos da etapa de preparação do corpo de prova	85
Figura 4. 4 – Malha de elementos finitos utilizada nas análises (CP34)	92
Figura 5. 1 – (a) Leitora de dados eletroquímicos e (b) Sondas utilizadas.	96
Figura 5. 2 – Curva de calibração do condutivímetro para o CaCl_2	97
Figura 5. 3 – Curva de calibração do condutivímetro para o NaCOOH	98
Figura 5. 4 – Sistema óptico básico	98
Figura 5. 5 – Novo equipamento para medida de concentração	101
Figura 5. 6 – Novo sensor utilizado no reservatório inferior	102
Figura 5. 7 – Variação do índice de refração com a concentração de CaCl_2	103
Figura 5. 8 – Variação do índice de refração com a concentração de NaCOOH	103
Figura 5. 9 – Variação da concentração de sais no reservatório inferior (CP32)	104
Figura 5. 10 – Esquema do equipamento utilizado no ensaio de difusão em solo residual	105
Figura 5. 11 – Variação da concentração de sais no ensaio com solo residual	106
Figura 5. 12 – Variação da concentração de sais no ensaio com alumínio vazado	107
Figura 5. 13 – Variação da concentração de sais no reservatório inferior (CP33)	108
Figura 5. 14 – Tubos plásticos com o folhelho em suspensão	109
Figura 5. 15 – Tubos plásticos com o folhelho após a centrifugação	109
Figura 5. 16 – Variação da concentração ao longo do ensaio (CP35)	111
Figura 5. 17 – Variação da concentração ao longo do ensaio (CP34)	112
Figura 5. 18 – Variação da razão dos sinais da fibra óptica em função do tempo e da temperatura	113

Figura 5. 19 – Variação da razão dos sinais da fibra óptica em função do tempo e da temperatura para ensaio com celofane na célula de difusão	114
Figura 5. 20 – Variação da razão (P_s/P_r) em função do tempo e da temperatura	115
Figura 5. 21 – Variação do índice de refração com a concentração para o CaCl_2 , NaCl e KCl	118
Figura 5. 22 – Variação da condutividade com a concentração para o CaCl_2 , NaCl e KCl	118
Figura 5. 23 – Variação da condutividade com a concentração para qualquer solução salina	119
Figura 5. 24 – Variação do índice de refração com a atividade para o CaCl_2 , NaCl e KCl	120
Figura 5. 25 – Variação da condutividade com a atividade para o CaCl_2 , NaCl e KCl	121
Figura 5. 26 – Variação da condutividade com a atividade para atividades maiores que 0,9	121
Figura 6. 1 – Lâmina delgada do folhelho N (Fontoura <i>et al.</i> , 1999)	126
Figura 6. 2 – Lâmina delgada do folhelho B-S (Rabe, 2003)	126
Figura 6. 3 – Erlemmeyers fixos ao agitador magnético	128
Figura 6. 4 – Centrifuga para separação das fases líquida e sólida	128
Figura 6. 5 – Folhelho após a separação em centrifuga	130
Figura 6. 6 – Gráfico de C_e versus C_s para todos os pontos com um ajuste logarítmico	131
Figura 6. 7 – Gráfico de C_e versus C_s para Isoterma Linear	132
Figura 6. 8 – Isoterma de Langmuir	133
Figura 6. 9 – Isoterma de Freundlich	134
Figura 6. 10 – Fase de saturação do CP30	138
Figura 6. 11 – Fase de saturação do CP15	140
Figura 6. 12 – Variação das pressões na fase de difusão de pressão do CP30	143
Figura 6. 13 – Variação das pressões na fase de difusão de pressão do CP31	144
Figura 6. 14 – Variação das pressões na fase de difusão de pressão do CP32	144
Figura 6. 15 – Variação das pressões na fase de difusão de pressão do CP34	145
Figura 6. 16 – Variação das pressões na fase de difusão de pressão do CP33	145
Figura 6. 17 – Variação das pressões na fase de difusão de pressão do CP37	146
Figura 6. 18 – Variação das pressões na fase de difusão de pressão do CP14	146
Figura 6. 19 – Variação das pressões na fase de difusão de pressão do CP15	147
Figura 6. 20 – Variação das pressões na fase de difusão de pressão do CP36	148
Figura 6. 21 – Variação das pressões na fase de difusão de pressão do CP38	148
Figura 6. 22 – Variação das pressões na segunda fase de difusão de pressão do CP14	149
Figura 6. 23 – Fase de difusão de íons do CP32	151

Figura 6. 24 – Fase de difusão de íons do CP30	152
Figura 6. 25 – Fase de difusão de íons do CP31	152
Figura 6. 26 – Fase de difusão de íons do CP33	153
Figura 6. 27 – Fase de difusão de íons do CP37	154
Figura 6. 28 – Fase de difusão de íons do CP15	155
Figura 6. 29 – Fase de difusão de íons do CP35	156
Figura 6. 30 – Desenvolvimento de pressão na base para o CP31 e CP35	157
Figura 6. 31 – Fase de difusão de íons do CP34 utilizando NaCOOH	158
Figura 6. 32 – Ensaio para obter a atividade química de soluções	159
Figura 6. 33 – Retirada de fluido do reservatório inferior para análise química	161

Lista de tabelas

Tabela 2. 1 – Transporte de massa em meios porosos (modificado de Mitchel, 1993)	25
Tabela 2. 2 – Resultados obtidos no folhelho Pierre II (Tan <i>et al.</i> 1996)	39
Tabela 3. 1 – Dados iniciais do corpo de prova (CP26)	60
Tabela 3. 2 – Dados iniciais dos corpos de prova	64
Tabela 4. 1 – Faixas de trabalho de cada mola da válvula de alívio	81
Tabela 4. 2 – Parâmetros utilizados na análise numérica do CP31	93
Tabela 5. 1 – Valores de concentração obtidos para cada tubo plástico	110
Tabela 5. 2 – Valores adotados e obtidos para a calibração do CaCl_2	116
Tabela 5. 3 – Valores adotados e obtidos para a calibração do NaCl	117
Tabela 5. 4 – Valores adotados e obtidos para a calibração do KCl	117
Tabela 6. 1 – Composição mineralógica dos folhelhos (Rabe, 2003)	124
Tabela 6. 2 – Análise semi-quantitativa dos minerais presentes nos folhelhos (Rabe, 2003)	124
Tabela 6. 3 – Concentração dos íons dissolvidos nos poros das amostras (ppm)	125
Tabela 6. 4 – Capacidade de troca catiônica do folhelho intacto (Rabe, 2003)	125
Tabela 6. 5 – Análise química das soluções	127
Tabela 6. 6 – Dados do ensaio	130
Tabela 6. 7 – Dados utilizados para traçar os gráficos de Freundlich e Langmuir	133
Tabela 6. 8 – Valores obtidos para o coeficiente de retardamento	134
Tabela 6. 9 – Dados iniciais dos corpos de prova	137
Tabela 6. 10 – Valores do parâmetro B de Skempton para os CPs 30,31 e 32	139
Tabela 6. 11 – Valores do parâmetro B para cada corpo de prova	140
Tabela 6. 12 – Valores de permeabilidade obtido para cada corpo de prova	143
Tabela 6. 13 – Valores dos parâmetros de difusão e permeabilidade obtidos	151
Tabela 6. 14 – Coeficiente de reflexão obtido para cada CP	159
Tabela 6. 15 – Análise química do fluido presente no reservatório inferior	163

Lista de símbolos

a_1	Atividade da água na região de menor concentração
a_2	Atividade da água na região de maior concentração
A_f	Atividade do folhelho
A_{fp}	Atividade do fluido de perfuração ou das soluções
A e B	Parâmetros de poropressão
b	Parâmetro que representa a velocidade ou energia de sorção
C	Concentração
C_0	Concentração inicial
C_e	Concentração de equilíbrio
C_s	Massa sorvida por unidade de massa de sólidos secos
De	Coeficiente de difusão efetivo
Dm	Coeficiente de difusão molecular
e	Índice de vazios
E	Módulo de elasticidade
G	Densidade dos grãos
H	Altura do corpo de prova
K	Permeabilidade
Kd	Coeficiente de distribuição
Kf	Módulo de compressibilidade do fluido
Ks	Módulo de compressibilidade dos grãos
Kfr e ε	Coeficientes de Freundlich
K_1	Razão de acoplamento
n_1	Índice de refração do líquido
n_2	Índice de refração da fibra óptica
Ms	Massa de solo
Mss	Massa de solo seca
Msor	Massa sorvida
P_0	Potência de luz emitida pelo LED
Pr	Potência de referência
Ps	Potência refletida na interface fibra-fluido
PMs	Peso molecular do soluto
PMw	Peso molecular do solvente
R	Constante universal dos gases
R_1	Coeficiente de refletividade
S	Grau de saturação
Sm	Capacidade de sorção do solo em relação à substância de interesse
T	Temperatura

w	Umidade natural
W	Peso do corpo de prova
V	Volume do corpo de prova
V_w	Volume parcial molar da água
α	Coeficiente de reflexão ou eficiência de membrana
α_L	Dispersividade longitudinal
α_T	Dispersividade transversal
ϕ	Porosidade
γ_T	Peso específico total
γ_w	Peso específico da água
τ	Coeficiente de tortuosidade
ν	Coeficiente de Poisson
ν_a	Mobilidade da água
ν_s	Mobilidade do soluto
ρ	Coeficiente de retardamento
ρ_s	Massa específica seca do solo
ΔP_{osm}	Pressão osmótica
Δu	Variação de poropressão
$\Delta \sigma_{conf}$	Variação de pressão confinante
$\Delta \sigma_{axial}$	Variação de pressão axial
Π	Pressão osmótica teórica