

**EFEITO DA MOBILIZAÇÃO DO ÓLEO RESIDUAL
NA PERDA DE INJETIVIDADE**

ALEXANDRE SÉRVULO LIMA VAZ JÚNIOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE - UENF
LABORATÓRIO DE ENGENHARIA E EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO - LENEP

MACAÉ - RJ

MAIO - 2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

EFEITO DA MOBILIZAÇÃO DO ÓLEO RESIDUAL NA PERDA DE INJETIVIDADE

ALEXANDRE SÉRVULO LIMA VAZ JÚNIOR

Dissertação apresentada ao Centro de
Ciência e Tecnologia da Universidade
Estadual do Norte Fluminense, como
parte das exigências para obtenção do
título de Mestre em Engenharia de
Reservatório e de Exploração

Orientador: Prof. Pavel G. Bedrikovetsky

MACAÉ - RJ
MAIO - 2007

EFEITO DA MOBILIZAÇÃO DO ÓLEO RESIDUAL
NA PERDA DE INJETIVIDADE

ALEXANDRE SÉRVULO LIMA VAZ JÚNIOR

Dissertação apresentada ao Centro de
Ciência e Tecnologia da Universidade
Estadual do Norte Fluminense, como
parte das exigências para obtenção do
título de Mestre em Engenharia de
Reservatório e de Exploração

Aprovada em 02 de maio de 2007

Comissão Examinadora:

Dr. Antonio Luiz Serra de Souza (Ph.D., Eng. Petróleo) - PETROBRAS/CENPES

Dr. Ronaldo Oliveira de Paiva (D.Sc., Eng. Reservatório) – PETROBRAS/UNBC

Prof. Luis Orlando Emerich dos Santos (D.Sc., Eng. Mecânica) – LENEP/CCT/UENF

Prof. Pavel G. Bedrikovetsky (Ph.D., Dinâmica dos Fluidos) – LENEP/CCT/UENF
Orientador

Agradecimentos

Ao Professor Pavel Bedrikovetsky pelos ensinamentos e incentivo à realização deste trabalho;

À Virgínia Prata, minha esposa, pelo amor, paciência e compreensão;

Aos demais professores, pelos conhecimentos transmitidos, em especial aos Professores C. A. Dias, pelo apoio, e Abel Carrasquilla pela autorização para a realização do Mestrado;

A todos os funcionários, pelo auxílio inestimável, especialmente a Bena e Valdiléia;

E à Petrobras pelo apoio à pesquisa no LENEP/UENF.

Sumário

Lista de Figuras	VIII
Lista de Tabelas	XII
Nomenclatura	XIII
Resumo	XV
Abstract	XVII
1. Introdução	1
2. Revisão Bibliográfica	6
2.1 Injeção de Emulsões em Meio Poroso	7
2.1.1 Caracterização das Emulsões	7
2.1.2 Estabilidade das Emulsões	8
2.2 Fenômeno da Mobilização de Óleo em Meio Poroso (Conceitos)	8
2.2.1 Tensão Interfacial	9
2.2.2 Pressão Capilar	10
2.2.3 Saturação e Óleo Residual	11
2.2.4 Permeabilidade e Lei de Darcy	12
2.2.5 Número Capilar e Curva de Dessaturação Capilar	14
2.3 Modelo Clássico para Filtração Profunda	17
2.4 Injeção de Emulsão/Suspensões em Testemunhos Contendo Óleo Residual	20

3.	Modelo Matemático de Filtração Profunda com Efeitos da Presença de Óleo Residual	23
3.1	Formulação do Problema.....	23
3.2	Lema sobre os Efeitos Capilares de Partículas Capturadas pelo Meio Poroso com Óleo Residual	25
3.3	Equação do Balanço de Massa	27
3.4	Cinética de Captura	27
3.5	Lei de Darcy Modificada.....	28
3.6	Saturação de Óleo Residual	28
3.7	Parâmetros Adimensionais	28
3.8	Formulação do Problema Inicial e de Contorno	29
4.	Modelo Analítico de Filtração Profunda com Efeitos da Presença de Óleo Residual	30
4.1	Estrutura do Fluxo da Emulsão no Meio Poroso.....	32
4.2	Modelo Analítico para o Coeficiente de Filtração Constante: Resultados da Modelagem	35
4.3	Modelo Analítico para Coeficiente de Filtração Linear: Resultados da Modelagem	42
4.4	Análise de Sensibilidade do Modelo aos Parâmetros.....	48
4.4.1	Sensibilidade ao Coeficiente Dano à Formação (β).....	48
4.4.2	Sensibilidade ao Coeficiente de Filtração (λ).....	51
4.4.3	Sensibilidade ao Parâmetro Deposição Máxima (S_m).....	53
4.4.4	Sensibilidade ao Número Capilar Crítico	56
4.4.5	Sensibilidade ao Óleo Residual do Platô (S_{or1}).....	59
4.4.6	Sensibilidade à Concentração de Partículas Oleosas da Emulsão Injetada (c^0)	62
4.5	Outros Modelos.....	64
5.	Procedimentos para Validação do Modelo e Correção de Testes de Permeabilidade Relativa	67
5.1	Descrição dos Testes.....	68
5.2	Modelo de Filtração de Emulsão Contendo Partículas com Dois Tamanhos Diferentes.....	79
5.3	Determinação da Permeabilidade Relativa e do Óleo Residual para Testes com Injeção de Água Produzida	81

Conclusões.....	83
Novidades Científicas.....	84
Recomendações para Trabalhos Futuros	85
Referências Bibliográficas	86
Apêndice A Relação entre Saturação de Óleo Residual com a Presença e Ausência de Partículas Depositadas	94
Apêndice B Sistema de Equações	97
Apêndice C Modelo Analítico para Filtração Profunda na Presença de Óleo Residual	99
Apêndice D Coeficiente de Filtração Constante	104
Apêndice E Coeficiente de Filtração Linear	107
Apêndice F A Modelo para injeção de emulsão com velocidade inferior à da formação do óleo residual	110

Lista de Figuras

Figura 1-1	Esquema mostrando a injeção de água com uma concentração “C” de partículas.....	2
Figura 1-2	Mecanismos de captura de partículas: (A) Exclusão pelo tamanho (i) e <i>bridging</i> (ii); (B) deposição; (C) movimento browniano de uma partícula sobre uma linha de fluxo.	4
Figura 2-1	Quebra de emulsões (a) coalescência, (b) separação de fases (c) floculação, (d) <i>creaming</i>	8
Figura 2-2	Esquema de gotas de óleo em gargantas de poros.....	10
Figura 2-3	Permeabilidade relativa das fases óleo e água.....	13
Figura 2-4	Esquema de um gânglio de óleo residual.	14
Figura 2-5	Curvas de Dessaturação Capilar (STEGEMEIER , 1977).....	16
Figura 2-6	Redução da permeabilidade normalizada pela permeabilidade inicial devido à injeção de emulsão água/óleo ($C^0=1000\text{ppm}$) para três testes em testemunhos semelhantes (Berea) com e sem óleo residual utilizando óleo Prudhoe-Bay (a) e Brent (b) (MENDEZ, 1999)	22
Figura 3-1	Fluxo de água (a) e Fluxo de emulsão água/óleo (b) no meio poroso ..	24
Figura 3-2	<i>Snap-off</i> de partículas de óleo do óleo residual devido ao aumento do gradiente de pressão.....	24

Figura 3-3	Determinação da quantidade de partículas de óleo liberadas pelo óleo residual a partir da CDC.....	26
Figura 4-1	Trajectoria das partículas no testemunho (características).....	33
Figura 4-2	Regiões de domínio da deposição e do <i>snap-off</i>	35
Figura 4-3	CDC utilizada para a análise do modelo com λ constante.....	37
Figura 4-4	Concentração adimensional no efluente <i>versus</i> tempo para 4 velocidades diferentes com λ constante.....	38
Figura 4-5	Deposição adimensional <i>versus</i> tempo para λ constante.....	39
Figura 4-6	Deposição <i>versus</i> distância (adimensionais) no tempo=100VPI para λ constante.....	39
Figura 4-7	Permeabilidade normalizada <i>versus</i> tempo para λ constante.....	41
Figura 4-8	Pressão adimensional <i>versus</i> tempo para λ constante.....	41
Figura 4-9	Concentração adimensional no efluente <i>versus</i> tempo em 4 velocidades diferentes para λ linear.....	44
Figura 4-10	Deposição adimensional <i>versus</i> tempo para λ linear.....	44
Figura 4-11	Deposição <i>versus</i> distância (adimensionais) no tempo=100VPI para λ linear.....	45
Figura 4-12	Permeabilidade normalizada <i>versus</i> tempo para λ linear.....	45
Figura 4-13	CDC utilizada para a análise do caso onde λ é linear.....	47
Figura 4-14	Sensibilidade da permeabilidade normalizada ao parâmetro dano à formação.....	49
Figura 4-15	Sensibilidade da curva de concentração adimensional do efluente ao parâmetro dano à formação.....	49
Figura 4-16	Sensibilidade ao parâmetro dano à formação da curva de deposição adimensional na saída do testemunho <i>versus</i> tempo.....	50
Figura 4-17	Sensibilidade da curva de deposição <i>versus</i> distância (adimensionais) ao parâmetro dano à formação.....	50
Figura 4-18	Sensibilidade da permeabilidade normalizada ao coeficiente de filtração.....	51
Figura 4-19	Sensibilidade da concentração adimensional do efluente ao coeficiente de filtração.....	52
Figura 4-20	Sensibilidade ao coeficiente de filtração da curva de deposição adimensional na saída do testemunho <i>versus</i> tempo.....	52

Figura 4-21	Sensibilidade da curva de deposição <i>versus</i> distância (adimensionais) ao coeficiente de filtração.....	53
Figura 4-22	Sensibilidade da permeabilidade normalizada <i>versus</i> tempo ao S_m	54
Figura 4-23	Sensibilidade da concentração adimensional no efluente ao S_m	54
Figura 4-24	Sensibilidade ao S_m da curva de deposição adimensional na saída do testemunho <i>versus</i> tempo.....	55
Figura 4-25	Sensibilidade ao S_m da curva de deposição <i>versus</i> distância (adimensionais).....	55
Figura 4-26	Três CDC utilizadas para o teste de sensibilidade ao número capilar crítico.....	56
Figura 4-27	Sensibilidade da permeabilidade normalizada ao número capilar crítico.....	57
Figura 4-28	Sensibilidade da concentração adimensional no efluente ao número capilar crítico.....	57
Figura 4-29	Sensibilidade ao número capilar crítico da curva de deposição adimensional na saída do testemunho <i>versus</i> tempo.....	58
Figura 4-30	Sensibilidade da deposição <i>versus</i> distância (adimensionais) ao número capilar crítico.....	58
Figura 4-31	Três CDC utilizadas para o teste de sensibilidade ao óleo residual do platô.....	59
Figura 4-32	Sensibilidade da permeabilidade normalizada <i>versus</i> tempo ao óleo residual do platô.....	60
Figura 4-33	Sensibilidade da concentração adimensional no efluente ao óleo residual do platô.....	60
Figura 4-34	Sensibilidade ao óleo residual do platô da curva de deposição adimensional na saída do testemunho <i>versus</i> tempo.....	61
Figura 4-35	Sensibilidade da deposição <i>versus</i> distância (adimensionais) ao óleo residual do platô.....	61
Figura 4-36	Sensibilidade da permeabilidade normalizada à concentração de partículas oleosas da emulsão.....	62
Figura 4-37	Sensibilidade da concentração adimensional no efluente à concentração de partículas oleosas da emulsão.....	63
Figura 4-38	Sensibilidade da curva de deposição no tempo, na saída do testemunho, à concentração de partículas oleosas da emulsão.....	63

Figura 4-39 Sensibilidade da deposição <i>versus</i> distância (adimensionais) à concentração de partículas oleosas da emulsão.....	64
Figura 5-1 Esquema de testes de Mendez (1999)	70
Figura 5-2 Modelo para injeção de emulsão com velocidade inferior à da formação do óleo residual	71
Figura 5-4 Ajuste da permeabilidade do testemunho total do teste 4, sem óleo residual (MENDEZ,1999).	72
Figura 5-5 Ajuste da concentração no efluente do testemunho total teste 4, sem óleo residual (MENDEZ,1999).	72
Figura 5-6 Ajuste da permeabilidade da seção B+C do teste 4, sem óleo residual (MENDEZ,1999).....	73
Figura 5-7 Ajuste da concentração no efluente da seção B+C do teste 4, sem óleo residual (MENDEZ,1999).	73
Figura 5-8 Ajuste da permeabilidade da seção B do teste 4, sem óleo residual (MENDEZ,1999).....	74
Figura 5-9 Ajuste da concentração no efluente da seção B do teste 4, sem óleo residual (MENDEZ,1999).	74
Figura 5-10 Ajuste da permeabilidade do testemunho total do teste 5, com óleo residual (MENDEZ,1999).	76
Figura 5-11 Ajuste da concentração no efluente do testemunho total teste 5, com óleo residual (MENDEZ,1999).....	76
Figura 5-12 Ajuste da permeabilidade da seção B+C do teste 5, com óleo residual (MENDEZ,1999).....	77
Figura 5-13 Ajuste da concentração no efluente da seção B+C do teste 5, com óleo residual (MENDEZ,1999).	77
Figura 5-14 Ajuste da permeabilidade da seção B do teste 5, com óleo residual (MENDEZ,1999).....	78
Figura 5-15 Ajuste da concentração no efluente da seção B do teste 5, com óleo residual (MENDEZ,1999).	78
Figura F-1 Curva de dessaturação capilar indicando o atraso na injeção da emulsão	111

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 - Resultados de deslocamento de óleo calculados para λ constante após 500 VPI	42
Tabela 4.2 – Resultados de deslocamento de óleo calculados para λ linear após 400 VPI	46
Tabela 5.1 - Parâmetros calculados nos ajustes dos testes 4 e 5.....	75

Nomenclatura

	Descrição	Dimensão	Unid. SI	Outra unid.
<i>A</i>	<i>Área da entrada do testemunho</i>	$[L]^2$	m ²	
<i>C</i>	<i>Concentração da suspensão no testemunho adimensional</i>			
<i>c</i>	<i>Concentração da suspensão no testemunho</i>		ppm	
<i>c^o</i>	<i>Concentração da suspensão injetada</i>		ppm	
<i>k</i>	<i>Permeabilidade</i>	$[L]^2$	m ²	$d \cong 1\mu\text{m}^2$
<i>k_o</i>	<i>Permeabilidade inicial</i>	$[L]^2$	m ²	$d \cong 1\mu\text{m}^2$
<i>k_{rw}</i>	<i>Permeabilidade relativa da água</i>			
<i>L</i>	<i>Comprimento do testemunho</i>	$[L]$	m	
<i>M</i>	<i>Constante empírica da Curva de Dessaturação Capilar (CDC)</i>			
<i>N_c</i>	<i>Número Capilar</i>			
<i>P</i>	<i>Pressão adimensional</i>			
<i>P_c</i>	<i>Pressão capilar</i>	$[M][T]^{-2}[L]^{-1}$	Pa	PSI
<i>p</i>	<i>Pressão</i>	$[M][T]^{-2}[L]^{-1}$	Pa	PSI
<i>Q</i>	<i>Vazão</i>	$[L]^3[T]^{-1}$	m ³ /s	
<i>r</i>	<i>Raio do testemunho</i>	$[L]$	m	
<i>S</i>	<i>Concentração adimensional das partículas depositadas no testemunho</i>			
<i>s</i>	<i>Saturação de óleo residual adimensional</i>			
<i>s_i</i>	<i>Saturação de óleo residual adimensional inicial</i>			

S_m	Concentração máxima adimensional das partículas depositadas no testemunho			
s_{or}	Saturação de Óleo Residual			
s_{or0}	s_{or} para um alto número capilar			
s_{or1}	s_{or} para um baixo número capilar (platô)			
s_{wi}	Saturação de água irreduzível			
t_D	Tempo adimensional em volumes porosos			
t	Tempo	[T]	s	
U	Velocidade de Darcy	[L][T] ⁻¹	m/s	
x_D	Distância linear adimensional			
x	Distância linear	[L]	m	

β	Coeficiente dano de formação			
θ	Ângulo de contato			
λ	Coeficiente de filtração adimensional			
λ'	Coeficiente de filtração	[L] ⁻¹	m ⁻¹	
λ_o	Coeficiente de filtração inicial adimensional			
μ_w	Viscosidade da água	[M][T] ⁻¹ [L] ⁻¹	Pa.s	$cp=1mPa.s$
σ	Concentração de partículas depositadas			
σ_m	Concentração Máxima de partículas depositadas			
σ_{ow}	Tensão interfacial óleo/água	[M][T] ⁻²	N/m	$dyne/cm = 1mN/m$
Φ	Função potencial			
ϕ	Porosidade			

Siglas

CDC	Curva de Dessaturação Capilar
VP	Volume Poroso
VPI	Volume Poroso Injetado

Resumo

Vaz Jr., A.S.L., Universidade Estadual do Norte Fluminense, maio/2007, “Efeito da Mobilização do Óleo Residual na Perda de Injetividade”, Orientador: Bedrikovetsky, P.G., Ph.D.

Água do mar, água produzida e outros tipos de água são injetadas em campos de petróleo para deslocar o óleo. Estas águas são de baixa qualidade e contêm partículas sólidas e líquidas. As partículas injetadas, contidas na água, são capturadas pelo meio poroso diminuindo a sua permeabilidade, formando o reboco e, conseqüentemente, reduzindo a injetividade. Para tentar manter a injetividade, aumenta-se o gradiente de pressão próximo ao poço.

Neste trabalho, vamos considerar o efeito da mobilização do óleo residual na vizinhança do poço devido ao aumento do gradiente de pressão e, conseqüentemente, do número capilar. A mobilização dos gânglios de óleo (óleo residual) ocorre pela liberação de gotas (*snap-off*). As gotas de óleo produzidas movem-se juntamente com as partículas injetadas e são capturadas pelos poros da rocha causando um dano à formação adicional.

O objetivo do estudo é o desenvolvimento de um modelo matemático para determinação da perda de injetividade em meios porosos contendo óleo residual, considerando, portanto, as gotas de óleo geradas pelo óleo residual deslocado e a

conseqüente redução adicional da permeabilidade. O modelo inclui expressões analíticas para o perfil de deposição de partículas, concentração do efluente e declínio de permeabilidade. Esse modelo será utilizado para o planejamento de testes laboratoriais de injeção de emulsão óleo/água em testemunhos contendo óleo residual.

O estudo de sensibilidade será efetuado considerando-se a vazão, concentração da emulsão, coeficiente dano de formação, coeficiente taxa de captura e curva de dessaturação capilar (CDC).

Palavras chave: meio poroso, emulsão, óleo residual, filtração profunda, suspensões.

Abstract

Vaz Jr., A.S.L., Universidade Estadual do Norte Fluminense, May/2007, "Injectivity Impairment Due to Residual Oil Mobilisation", Supervisor: Bedrikovetsky, P.G., Ph.D.

Injection of water with solid and oily particles happens during waterflooding using seawater, produced water and other waters of poor quality. The injected particles are captured by porous rock causing decrease of permeability, cake formation and consequent injectivity decline. Maintenance of the injection rate results in increase of pressure gradient near to well.

We consider effects of mobilization of residual oil in well vicinity due to increase of pressure gradient and, consequently, the increase of capillary number. The mobilized oil ganglia perform snap-off and release oil drops that move together with the injected particles; they are captured by porous rock causing additional formation damage.

In the current work a simplified analytical model that covers effects of oil drops generation and additional permeability reduction is developed. The model includes analytical expressions for deposition profiles, breakthrough curves and permeability decline. It was used for planning and design of laboratory test on injection of oily water into residual-oil-containing core.

The sensitivity study was performed with regards to flow velocity, capillary desaturation curve (CDC), injected concentration and formation damage parameters. The main result is an additional formation damage induced by particles released by residual oil.

Keywords: porous media, emulsion, residual oil, deep bed filtration, suspensions.

1. Introdução

A modelagem do processo de filtração durante o transporte de partículas através do meio poroso é de grande importância científica e industrial. Muitas aplicações podem ser identificadas em áreas como petróleo, química e engenharia ambiental. Nos reservatórios de petróleo o transporte de partículas ocorre durante a injeção de água onde a captura de partículas resulta em declínio de injetividade devido ao dano à formação. O transporte e captura de partículas ocorre também, no descarte de água produzida quando injetada em aquíferos subterrâneos, na invasão do meio poroso pelo fluido de perfuração, onde o dano à formação controlado é desejado, durante a migração de finos na produção de óleo pesado em reservatórios mal consolidados, resultando em declínio de produtividade, e durante o controle de produção de areia por *gravel pack* (empacotamento de telas com areia ou cerâmica) e *sand screens*. Dos mecanismos de captura de partículas, a exclusão pelo tamanho é o dominante na maioria dos processos mencionados acima.

O fluxo de suspensões em meio poroso com partículas capturadas pela matriz ocorre, também, na área de engenharia ambiental onde vírus e bactérias são transportados pela água através do solo e contaminam aquíferos subterrâneos. Este tipo de filtração é tradicionalmente utilizado na indústria para a filtração de água e outros líquidos.

O transporte de uma suspensão de partículas através de um meio poroso com a conseqüente captura das mesmas, também conhecido como filtração profunda, é um processo que pode causar dano à formação (meio poroso). A previsão da propagação e retenção de partículas por modelos matemáticos é uma etapa essencial para o planejamento e realização de projetos industriais e ambientais mencionados acima.

Quase toda operação em poços de petróleo (perfuração, cimentação, injeção de fluidos, etc.) é uma fonte de dano à formação. Danificar a formação implica em queda de produtividade e/ou injetividade. Para evitar as dificuldades e o alto custo envolvido na recuperação de uma formação danificada é necessário, na maioria dos casos, minimizar o dano à formação.

Durante a produção de petróleo, a pressão no reservatório tende a diminuir. Conseqüentemente, haverá um declínio de produção. Devido a este fato, torna-se necessário injetar fluidos no reservatório que, além de manter a pressão, também têm a função de deslocar o óleo (ou gás) em direção ao poço produtor (Fig. 1-1).



Figura 1-1 - Esquema mostrando a injeção de água com uma concentração “C” de partículas.

A injeção de água é o principal método utilizado no Brasil para a produção de petróleo, especialmente, nos campos *off-shore*. Esta é uma das principais razões para os altos volumes de água produzida. Por questões de custo e disponibilidade utiliza-se, principalmente, a água do mar nos poços injetores. Após um determinado tempo de injeção, inicia-se a produção de grande quantidade de água juntamente com o óleo. Esta mistura (constituída por água, óleo, bactérias, partículas da própria formação, compostos químicos dissolvidos, etc.) possui vários componentes que, de

acordo com leis ambientais, impedem que ela seja descartada sem um prévio tratamento. Devido ao alto custo do tratamento para o descarte, muitas vezes decide-se pela a reinjeção da água produzida. A Petrobras tem hoje, um amplo programa para reinjeção de água produzida (FURTADO *et al.*, 2005, SOUZA *et al.*, 2005).

A água injetada (de mar, rios ou produzida) contém partículas em suspensão (bactérias, algas, argilas) que são retidas durante o escoamento pelo meio poroso. As partículas retidas no interior dos poros diminuem a permeabilidade da rocha ao redor do poço injetor, dificultando a injeção da água e causando um fenômeno chamado de perda de injetividade. Este fenômeno pode ser previsto a partir de diversos modelos matemáticos (PANG e SHARMA, 1997; BEDRIKOVETSKY *et al.*, 2001,2003). Suas conseqüências são drásticas em campos de águas profundas ou ultra-profundas, onde o custo de perfuração de um poço injetor atinge a ordem de dezenas de milhões de dólares. Uma previsão confiável da queda da injetividade é importante para o planejamento desse método de recuperação de petróleo, bem como para a escolha do tratamento preventivo da água de injeção e para avaliação dos custos de produção.

No gerenciamento da água nos campos de petróleo, o comportamento da queda de injetividade deve ser precisamente entendido para permitir uma comparação consistente entre as duas opções: realizar um bom tratamento da água e necessitar de poucas intervenções no poço injetor ou, ao contrário, injetar água com pior qualidade e fazer freqüentes intervenções.

De modo geral, o declínio na injetividade ocorre devido ao entupimento do meio poroso, que pode ocorrer devido a vários mecanismos:

- a) Exclusão pelo tamanho: ocorre quando uma partícula encontra um poro de raio menor que o dela (Fig. 1-2A);
- b) Deposição: devido às forças gravitacional e elétrica, as partículas podem ser desviadas da trajetória sugerida pelas linhas de fluxo e depositadas no interior do meio poroso (Fig. 1-2B);
- c) *Bridging*: ocasionado pelo acúmulo de várias partículas nas gargantas dos poros. Neste caso, as partículas são menores que a garganta. Este processo é favorecido pelo aumento da deposição de partículas nas gargantas dos poros (Fig. 1-2A);

d) Difusão: devido à difusão, ocorre um aumento da probabilidade de partículas serem capturadas (Fig. 1-2C).

A efetividade de cada mecanismo de captura de partículas depende das forças de interação entre o meio poroso, o fluido injetado e as partículas suspensas (SHARMA e YORTSOS, 1987).

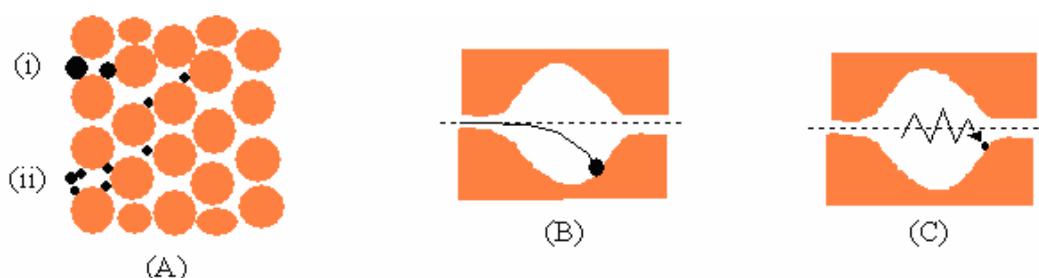


Figura 1-2 - Mecanismos de captura de partículas: (A) Exclusão pelo tamanho (i) e *bridging* (ii); (B) deposição; (C) movimento browniano de uma partícula sobre uma linha de fluxo.

Em um processo de filtração, parâmetros como a velocidade, a concentração de partículas, a distribuição do tamanho de partículas, a distribuição de tamanho de poros, as energias de interação (partícula-partícula e partícula-poro) e a composição do fluido e das partículas injetadas, podem determinar o(s) mecanismo(s) de retenção de partículas mais efetivo(s) (CHAUVETEAU *et al.*, 1998, HERZIG *et al.*, 1970, SHARMA e YORTSOS, 1987, IVES, 1963, ROQUE *et al.*, 1995, TUFENKJI e ELIMELECH, 2004).

Um modelo fenomenológico para captura de partículas, com conseqüente queda de permeabilidade, foi proposto por IWASAKI (1937) e utilizado na teoria de filtração (HERZIG *et al.*, 1970) e na previsão do declínio de permeabilidade de rochas (BEDRIKOVETSKY *et al.*, 2001, PANG e SHARMA, 1997).

O modelo acima mencionado, apresentado no Capítulo 2, exibe uma boa concordância com testes laboratoriais. Portanto, pode ser utilizado para fins de previsão, como a determinação da perda de injetividade ou redução da permeabilidade, baseado em testes laboratoriais. No entanto, o modelo acima não prevê os efeitos do óleo residual existente no momento em que se inicia a injeção de água produzida.

O propósito deste trabalho é desenvolver um modelo matemático baseado no modelo citado, que leve em conta o dano adicional causado pela existência de óleo residual, quando se injeta água contendo partículas oleosas. O problema da modelagem de fluxo de água oleosa em meio poroso tem grande importância tanto na ciência de fluxo em meio poroso como aplicação na indústria. Além disso, um modelo simples, robusto e com representatividade física não se encontra na literatura.

No segundo capítulo deste trabalho, apresentamos uma revisão bibliográfica sobre emulsões e água produzida (Item 2.1), conceitos básicos de petrofísica ligados à filtração de águas oleosas (Item 2.2) e modelo clássico para filtração profunda (2.3) onde fica claro que o modelo clássico não leva em consideração os fenômenos de mobilização de óleo residual. A análise crítica da literatura permite afirmar a importância do problema da modelagem de filtração de água oleosa considerando a mobilização do óleo residual e a falta de disponibilidade desse modelo na literatura existente. Partindo desta conclusão, formulamos o problema da tese e objetivos do trabalho (capítulo 3).

Ainda no capítulo 3 deduzimos as equações básicas para a filtração profunda de água oleosa em testemunhos contendo óleo residual.

A solução analítica desse modelo é deduzida no capítulo 4. O problema da validação do modelo deduzido, pela comparação com dados experimentais, é apresentado no capítulo 5. Seguem conclusões, novidades científicas e recomendações para trabalhos futuros.

2. Revisão Bibliográfica

As propriedades físico-químicas da água produzida dependem da localização geográfica, formação geológica e tipo do hidrocarboneto existente no campo. A água produzida consiste em água contendo materiais inorgânicos e orgânicos da formação geológica e dos hidrocarbonetos associados ao campo dissolvidos ou em suspensão. A composição da água produzida pode mudar muito ao longo da vida produtiva do reservatório, especialmente quando a água injetada no poço injetor (normalmente água do mar nos campos *off-shore*) chega no poço produtor.

A água produzida contém produtos químicos utilizados no tratamento da água, dos poços e da separação água/óleo, tais como: solventes, bactericidas, surfactantes, anticorrosivos, etc. Normalmente, a água produzida tem uma salinidade maior que a água do mar (KHAMBHARATANA, 1993).

A reinjeção de água produzida para manutenção da pressão no reservatório tem se tornado atrativa para a indústria a partir das novas regulamentações para descarte de águas no mar, rios, ou aquíferos profundos que introduzem o aumento de custos de tratamento. A principal dificuldade da reinjeção é a previsão do impacto da qualidade da água produzida na injetividade dos poços.

Isto acontece devido ao pouco conhecimento dos mecanismos de dano à formação por partículas sólidas e gotículas de óleo .

Neste trabalho vamos estudar o efeito do dano à formação, causado por partículas de óleo existentes na água produzida, quando o meio poroso possui óleo residual. Para tanto, vamos estudar, em especial, a injeção de emulsões com baixa concentração em meios porosos contendo óleo residual.

2.1 Injeção de Emulsões em Meio Poroso

Em reservatórios de óleo, a injeção de emulsão é importante em vários tipos de projetos de recuperação avançada (LAKE,1989). As emulsões têm sido estudadas para o controle de mobilidade com o bloqueio e/ou isolamento de determinadas áreas do reservatório sujeitas à injeção de água ou vapor (MCAULIFFE,1973a, 1973b). Emulsões estáveis são utilizadas como um agente de controle da mobilidade no meio poroso (JOHNSON JR., 1975).

Vamos apresentar uma rápida revisão dos principais aspectos de uma emulsão incluindo propriedades, métodos de caracterização e estabilidade, focados nas emulsões óleo/água, que é o tipo de emulsão de interesse para este trabalho.

2.1.1 Caracterização das Emulsões

Emulsões são colóides (dispersões coloidais) formadas por um líquido (fase dispersa) disperso em outro líquido (fase contínua) com a presença de surfactantes (emulsificantes). Os emulsificantes reduzem a tensão interfacial entre os líquidos e ajudam a estabilizar as gotas dispersas evitando a coalescência. As emulsões podem ser classificadas como macro-emulsões se as gotas dispersas tiverem diâmetro maior que $0,1\mu\text{m}$ e micro-emulsões se as gotas tiverem diâmetro menor que $0,1\mu\text{m}$. Geralmente, as gotas das macro-emulsões possuem diâmetro maior que $1\mu\text{m}$ e são da mesma ordem de magnitude das gargantas dos poros das rochas sedimentares

Dependendo de quem é a fase dispersa e a fase contínua, existem, basicamente, dois tipos de emulsão: a emulsão água/óleo e a emulsão óleo/água. No primeiro tipo a viscosidade da emulsão é maior que a viscosidade da água e do

óleo. No segundo caso, a viscosidade é menor que o óleo constituinte. Existem também emulsões mais complexas como óleo/água/óleo e água/óleo/água (KHAMBHARATANA, 1993).

No caso de nosso interesse (gotas de óleo na água produzida) a emulsão é do segundo tipo com baixa concentração da fase dispersa. Neste caso, normalmente se considera que a viscosidade da emulsão é a mesma da água.

2.1.2 Estabilidade das Emulsões

As emulsões são feitas com a mistura de dois líquidos imiscíveis. Diversos produtos químicos são utilizados para aumentar a estabilidade e evitar a quebra da emulsão. Quanto mais estável é uma emulsão maior é o tempo que a fase dispersa demora a se juntar por coalescência, floculação ou *creaming*, quebrando assim a emulsão (MENDEZ, 1999) (Fig. 2-1).

A estabilidade da emulsão é favorecida por vários fatores, tais como, a baixa tensão interfacial, filmes interfaciais estáveis, barreira eletrostática, pequeno volume de fase dispersa, alta viscosidade da fase contínua e gotas pequenas e uniformes. A água produzida, normalmente possui diversos destes fatores o que torna a sua emulsão estável (KHAMBHARATANA, 1993).

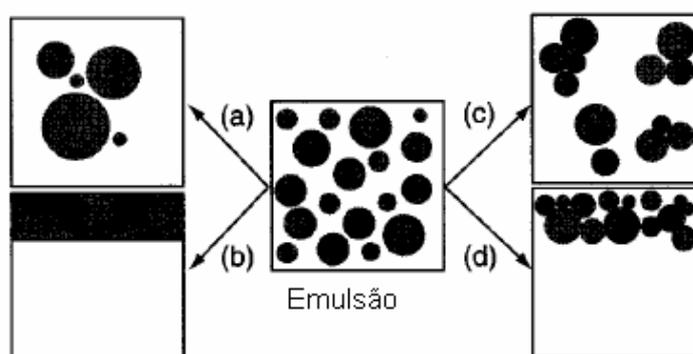


Figura 2-1 - Quebra de emulsões (a) coalescência, (b) separação de fases (c) floculação, (d) *creaming*

2.2 Fenômeno da Mobilização de Óleo em Meio Poroso (Conceitos)

Apresentaremos a seguir alguns conceitos básicos de petrofísica ligados à filtração de água oleosa.

2.2.1 Tensão Interfacial

Moléculas de uma substância em sua fase líquida atraem umas as outras. Uma molécula de um líquido será atraída por outras moléculas ao seu redor e, na média, não experimentará nenhuma força resultante. Quando o líquido está em contato com outro, as forças de atração sobre as moléculas situadas na superfície do líquido, ou perto dela, não estarão mais em equilíbrio e estas sofrerão uma força resultante, normalmente na direção da superfície para dentro do líquido, isto, no caso da atração entre as moléculas no líquido ser mais forte do que a do líquido e o meio. Devido a este efeito, o líquido tenderá a assumir um formato que apresente uma área mínima de superfície, que, no caso de uma gota de óleo em água, será uma esfera. Devido a esta tendência espontânea de se contrair, a superfície do líquido se comporta como uma membrana de borracha sob tensão. Para se aumentar a área desta superfície, trabalho deve ser exercido no líquido. A energia associada a este trabalho é conhecida como energia livre superficial E , que dividida pela área superficial A recebe o símbolo σ , sendo denominada tensão interfacial, ou seja:

$$\sigma = \left(\frac{\partial E}{\partial A} \right)_{T,p,n_i} \quad (2.2.1.1)$$

onde T é a temperatura, p a pressão e n_j o número de moles do i -ésimo componente para sistemas multicomponentes. A unidade da tensão interfacial é de energia por unidade de área ou força por unidade de comprimento. Interfaces líquido-líquido estão presentes entre dois líquidos imiscíveis, tais como óleo e água. A tensão interfacial é uma quantidade fundamental que caracteriza as propriedades superficiais de um determinado líquido. A superfície na qual a tensão interfacial é aplicada é tri-dimensional, com uma espessura muito pequena e suas propriedades variam daquela das fases que esta separa. No caso de líquido-gás, chamamos σ de tensão superficial.

2.2.2 Pressão Capilar

A pressão capilar é a diferença de pressão na interface entre as duas fases (a que molha o meio poroso e a não molhante). Neste trabalho vamos considerar, sempre, a água como a fase molhante.

A pressão capilar (P_c) numa gota de óleo localizada numa garganta de poro (Fig. 2-2) é definida pela equação de Yung-Laplace (2.2.2.1):

$$P_c = \sigma_{ow} \cos \theta \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (2.2.2.1)$$

onde σ_{ow} é a tensão superficial, r_1 e r_2 são os raios de curvatura e θ é o ângulo de contato. Ela determina o tamanho do poro no qual uma interface pode existir. É uma medida relativa da atração das moléculas de um líquido (coesão) por outro e por uma superfície sólida (adesão). A pressão capilar representa a tendência do meio poroso para atrair o fluido molhante e repelir o fluido não molhante. A molhabilidade é definida como a tendência de um fluido aderir à superfície de um sólido. Em nosso trabalho, vamos considerar que a rocha é 100% molhável pela água ($\theta=0^\circ$).

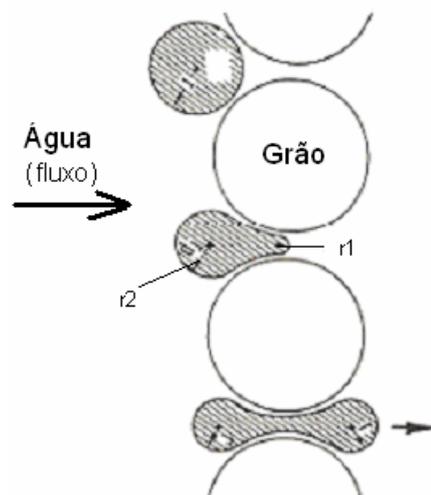


Figura 2-2 – Esquema de gotas de óleo em gargantas de poros.

2.2.3 Saturação e Óleo Residual

A saturação de um fluido num meio poroso é definida como a fração relativa do fluido em relação ao espaço poroso total.

O deslocamento de um fluido por outro fluido imiscível (fluxo bifásico) num meio poroso possui características distintas do deslocamento monofásico. Cada fluido apresenta uma pressão distinta do outro devido à tensão na interface. Esta diferença de pressão num testemunho, a pressão capilar, é usualmente apresentada como uma função da saturação de uma das fases (2.2.3.1), através da função empírica de Leverett $J(s)$ (2.2.3.2) (LAKE, 1989):

$$P_c(s) = \frac{\sigma_{ow} \cos \theta}{\sqrt{k/\phi}} J(s) \quad (2.2.3.1)$$

$$J(s) = C \left(\frac{1 - s_{wi} - s_{or}}{s - s_{wi}} \right)^{1/\varepsilon} \quad (2.2.3.2)$$

onde C e ε são constantes empíricas e s é a saturação, k é a permeabilidade e ϕ é a porosidade do meio.

A interferência no fluxo pelas fases é representada pela permeabilidade relativa que é apresentada como uma função da saturação de cada fluido (quantidade que cada fluido ocupa no meio poroso). Somente a porção conectada de uma fase contribui para a permeabilidade relativa e, portanto, para o fluxo. A saturação da fase que está desconectada é chamada de saturação trapeada. A saturação na qual a permeabilidade relativa tende a zero é chamada de saturação residual e é usualmente igual à saturação trapeada para a fase não molhante que, no caso da fase óleo nos reservatórios de petróleo, é chamada óleo residual. Nas rochas molháveis pela água, o óleo residual fica disperso em forma de gânglios que ocupam o espaço de muitos poros (CHATZIS e MORROW, 1984, CHATZIS *et. al.*, 1983, 1988, MORROW *et. al.*, 1988). Normalmente, os gânglios ocupam os poros maiores da rocha (SCHMIDT *et. al.* 1984).

2.2.4 Permeabilidade e Lei de Darcy

Na maioria dos testes laboratoriais para o estudo de filtração profunda, efetuamos a injeção de fluidos em testemunhos de forma unidirecional. Vamos considerar o fluxo dos líquidos no meio poroso sempre como um escoamento laminar em um meio isotrópico. Nestas condições, a Lei de Darcy (2.2.4.1) relaciona a velocidade do fluido com a pressão através de uma constante de proporcionalidade. Esta constante é fisicamente interpretada como uma razão entre propriedades da rocha (meio poroso) e do fluido presente na rocha, chamadas respectivamente de permeabilidade e viscosidade. A permeabilidade tem dimensão $[L^2]$ e sua unidade usual é Darcy ($1d \approx 1\mu m^2$). Ela é uma característica do meio poroso dependendo da porosidade, diâmetro dos poros e tortuosidade.

$$U = -K' \frac{\Delta P}{L} = -\frac{k}{\mu} \frac{\Delta P}{L} \quad (2.2.4.1)$$

onde k é a permeabilidade (propriedade da rocha), μ é a viscosidade (propriedade do fluido) e U (velocidade do fluido) é dada pela relação entre o fluxo Q e a área total A da superfície de entrada do testemunho:

$$U = \frac{Q}{A} \quad (2.2.4.2)$$

Quando temos fluidos imiscíveis no meio poroso, temos que a velocidade de um dos fluidos é dada por (LAKE, 1989):

$$u_j = -K'_j \frac{\Delta P_j}{L} \quad (2.2.4.3)$$

onde K'_j é a mobilidade da fase j , dada por:

$$K'_j = k \frac{k_{rj}}{\mu_j} \quad (2.2.4.4)$$

onde k é a permeabilidade absoluta, k_{rj} é a permeabilidade relativa da fase j e μ_j é a viscosidade da fase j .

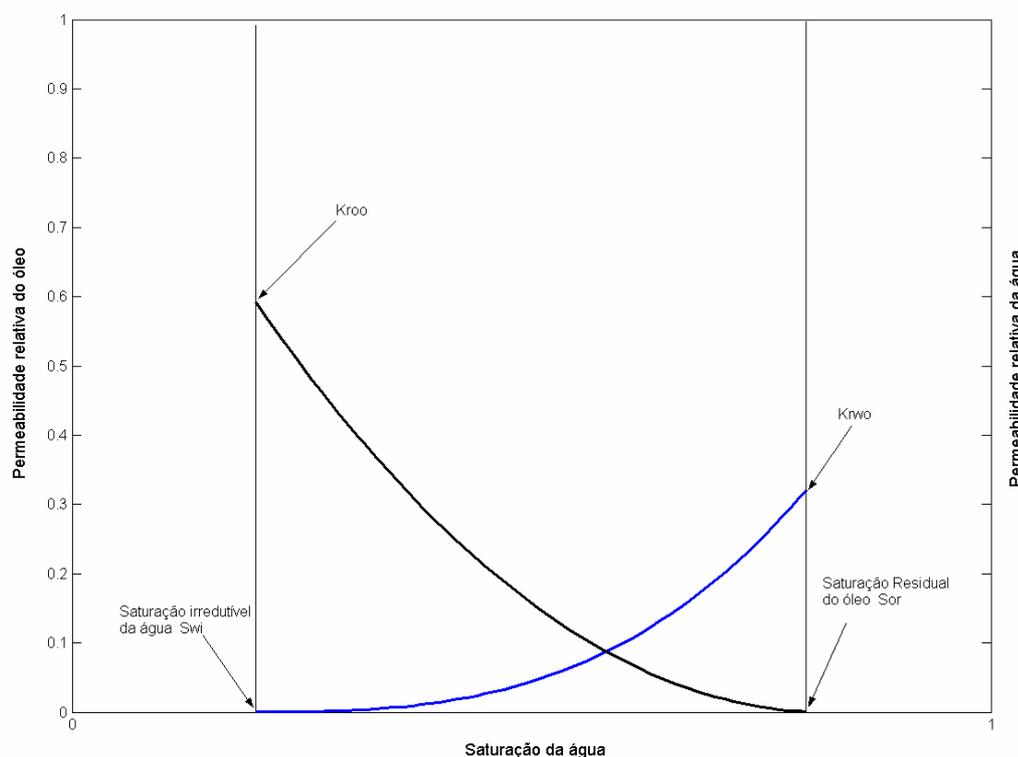


Figura 2-3 – Permeabilidade relativa das fases óleo e água.

A saturação é a fração de um determinado fluido no espaço poroso em relação ao volume poroso. A mobilidade de um fluido no meio poroso está relacionada à sua saturação através da permeabilidade relativa. As funções para a permeabilidade relativa são empíricas do tipo (2.2.4.5) para o fluido molhante e (2.2.4.6) para o fluido não molhante, água e óleo, respectivamente, para o nosso caso (Fig. 2-3) (LAKE, 1989):

$$k_{rw} = k_{rwo} \left(\frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_{or} - S_{wi}} \right)^{nw} \quad (2.2.4.5)$$

$$k_{ro} = k_{roo} \left(\frac{1 - S_w - S_{or}}{1 - S_{or} - S_{wi}} \right)^{no} \quad (2.2.4.6)$$

onde nw e no são constantes empíricas e k_{rwo} e k_{roo} são as permeabilidades na saturação máxima de água e óleo respectivamente.

2.2.5 Número Capilar e Curva de Dessaturação Capilar

Para mobilizar um gânglio de óleo, a pressão na frente do gânglio deve exceder à pressão capilar na garganta do poro (2.2.5.1) (Fig. 2-4).

$$P_c > \frac{2\sigma_{ow}}{r_g} \quad (2.2.5.1)$$

onde r_g é o raio da garganta do poro.

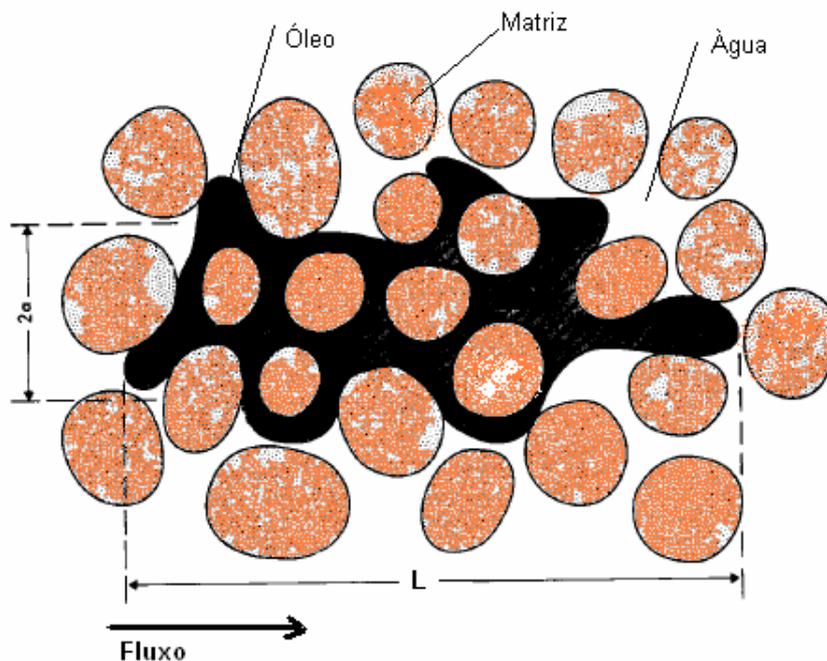


Figura 2-4 - Esquema de um gânglio de óleo residual.

Supondo que o comprimento do gânglio é L (Fig. 2-4) e estamos injetando água no meio poroso, temos que o gradiente de pressão exercido pelo fluxo da água com velocidade U é:

$$\Delta P = \frac{U \mu_w}{k} L \quad (2.2.5.2)$$

Portanto, para que o gânglio se mobilize, $\Delta P > P_c$:

$$\frac{U \mu_w}{k} L > \frac{2\sigma_{ow}}{r_g} \quad (2.2.5.3)$$

Considerando o comprimento e a permeabilidade (a permeabilidade tem dimensão $[L]^2$) proporcionais ao raio do poro, ($L=\alpha r_g$ e $k=\gamma r_g^2$ onde α e γ são constantes de proporcionalidade) e substituindo estes valores em (2.2.5.3), temos que a condição para mobilização do gânglio é dada por:

$$\frac{U \mu_w}{\sigma_{ow}} > \frac{\gamma}{\alpha} \quad (2.2.5.4)$$

onde a expressão à esquerda da inequação (2.2.5.4) é conhecida como Número Capilar:

$$N_c = \frac{U \mu_w}{\sigma_{ow}} \quad (2.2.5.5)$$

A relação entre o número capilar e a saturação residual é chamada de curva de dessaturação capilar (CDC) (Fig. 2-5). Alguns autores adotam outras formas de número capilar (ex: $N_c = \frac{k\Delta P}{\sigma_{ow}L}$, entre outras) (LAKE, 1989). Neste trabalho, adotaremos a forma dada por (2.2.5.5).

Existem dois principais métodos para a obtenção da CDC:

a) CDC efetuada pelo deslocamento de óleo contínuo (conectado). Basicamente, em um testemunho saturado com óleo, injeta-se água em uma determinada vazão até não mais haver óleo no efluente e mede-se o óleo residual. Depois, satura-se novamente o testemunho com óleo e repete-se o procedimento com uma vazão de água maior, medindo-se novamente o óleo residual. Após várias medidas do óleo residual para diversas vazões, converte-se a vazão para número capilar e plota-se a CDC.

b) CDC efetuada pelo deslocamento de óleo descontínuo (desconectado). Basicamente, em um testemunho saturado com óleo, injeta-se água em uma determinada vazão muito baixa até não mais haver óleo no efluente e mede-se o óleo residual. Depois, aumenta-se a vazão de água mantendo-se a injeção até não mais existir óleo no efluente, mede-se novamente o óleo residual. Após várias medidas do óleo residual para diversas vazões, converte-se a vazão para número capilar e plota-se a CDC.

Para um mesmo testemunho e mesmo óleo, as curvas de dessaturação capilar com óleo contínuo e descontínuo apresentam diferenças. Na parte côncava da CDC (velocidades mais baixas), o deslocamento com óleo contínuo implica em uma quantidade menor de óleo residual e, portanto, em uma maior recuperação de óleo. Testes comparativos entre os dois métodos foram realizados por CHATZIS e Morrow (1984).

No caso de nosso interesse (reinjeção de água produzida), devemos utilizar a CDC obtida pelo deslocamento de óleo descontínuo. Utilizaremos, sempre, CDC para óleo típicas de arenitos (molháveis pela água).

Os principais elementos que caracterizam a CDC utilizados na literatura são o platô, região de baixas velocidades (N_c de 10^{-7} a 10^{-5}) onde o óleo residual é muito pouco mobilizado, e o número capilar crítico, número capilar a partir do qual a mobilização do óleo residual passa a ser intensa.

De uma maneira geral, as velocidades de injeção de água no poço injetor ocorrem na faixa do platô e as da produção de água, quando a água injetada chega ao poço produtor, ocorrem na faixa acima do número capilar crítico, gerando emulsão óleo/água. No entanto, vamos mostrar que, quando há injeção de água com partículas oleosas (caso da água produzida), o número capilar nos gânglios de óleo residual da zona de dano do poço injetor pode atingir o número capilar crítico e provocar um aumento significativo da permeabilidade.

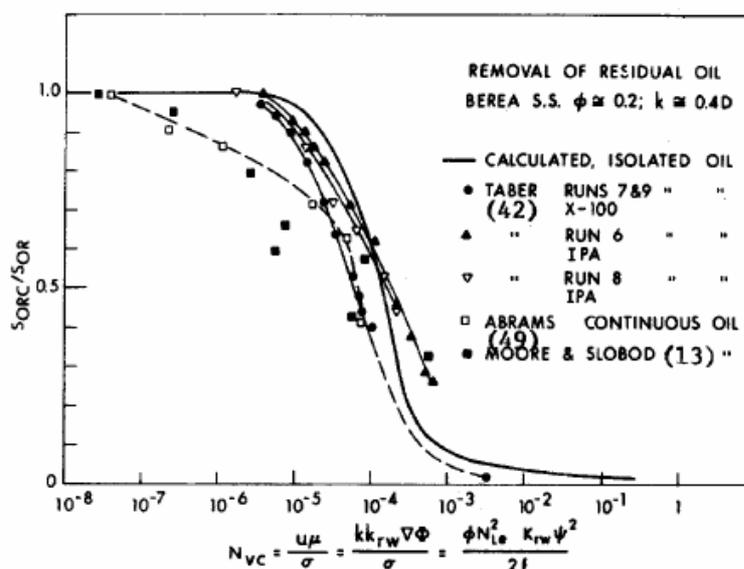


Figura 2-5 – Curvas de Dessaturação Capilar (STEGEMEIER, 1977)

Pela equação do número capilar e observação da CDC (Fig. 2-5), podemos ver que o óleo residual pode ser mobilizado a partir do aumento da velocidade do fluxo, da pressão de injeção da água ou da redução da tensão superficial. Diversos estudos, testes e métodos foram desenvolvidos com o objetivo de mobilizar o óleo residual, principalmente com vistas ao aumento do fator de recuperação do óleo no reservatório.

A forma usual da equação que descreve a CDC e que utilizaremos neste trabalho é:

$$S_{or} = S_{or0} + \frac{S_{or1} - S_{or0}}{1 + MN_c} \quad (2.2.5.6)$$

onde s_{or0} é o menor valor para o óleo residual em altas velocidades, s_{or1} é o maior valor do óleo residual para baixas velocidades, M é uma constante empírica e N_c o número capilar.

2.3 Modelo Clássico para Filtração Profunda

O sistema de equações clássico que descreve o processo de filtração profunda consiste das equações de balanço de massa das partículas, da cinética de captura de partículas e da lei de Darcy modificada (HERZIG *et al.*, 1970). Considerando-se a injeção de água contendo partículas em suspensão e o fluxo unidirecional, temos:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\phi c(x,t) + \sigma(x,t))}{\partial t} + U \frac{\partial c(x,t)}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial \sigma(x,t)}{\partial t} = \lambda'(\sigma) \phi c(x,t) U \\ U = - \frac{k(\sigma)}{\mu_w} \frac{\partial p}{\partial x} \end{cases} \quad (2.3.1)$$

onde, λ' é o coeficiente de filtração dimensional, x e t são coordenada e tempo dimensionais, respectivamente (considerando-se o fluxo apenas na direção x); ϕ é a

porosidade; U é a velocidade de Darcy (vazão por unidade de área da seção transversal ao fluxo); $c(x,t)$ é a concentração de partículas em suspensão (número de partículas em suspensão por unidade de volume poroso); $\sigma(x,t)$ é a concentração de partículas capturadas (número de partículas retidas por unidade de volume da amostra). A função de dano à formação $k(\sigma)$ relaciona a queda de permeabilidade com a retenção de partículas e é caracterizada pelo coeficiente dano à formação β .

$$k(\sigma) = \frac{k_0}{1 + \beta\sigma} \quad (2.3.2)$$

O sistema é adimensionalizado da seguinte forma:

$$x_D = \frac{x}{L}; \quad t_D = \frac{Ut}{L\phi}; \quad C = \frac{c}{c^0}; \quad \lambda = \lambda' L; \quad P = \frac{k_0}{\mu_w UL} p \quad (2.3.3)$$

onde λ é o coeficiente de filtração adimensional que está relacionado à probabilidade de uma partícula ser capturada durante o fluxo através de uma amostra de comprimento L ; x_D e t_D são a coordenada e o tempo adimensionais, respectivamente.

As condições iniciais e de contorno para o sistema (2.3.1) adimensionalizado são dadas por:

$$\begin{cases} x_D = 0 : C(0, t_D) = 1 \\ t_D = 0 : C(x_D, 0) = 0; \quad \sigma(x_D, 0) = 0 \end{cases} \quad (2.3.4)$$

De acordo com o modelo clássico, no caso onde o coeficiente de filtração é constante, o comprimento de penetração médio para partículas é igual à $1/\lambda'$. Portanto, pode-se interpretar o coeficiente de filtração como sendo o inverso da penetração média das partículas.

A velocidade U é independente de x_D devido à incompressibilidade da suspensão. Portanto, a terceira equação (2.3.1) pode ser separada da primeira e segunda equações, que podem ser resolvidas independentemente. A primeira e segunda equações (2.3.1) formam um modelo cinético para o transporte e captura de partículas. A terceira equação é um modelo dinâmico que prevê o aumento do

gradiente de pressão devido à queda de permeabilidade com o aumento da concentração de partículas capturadas.

Se o coeficiente de filtração é constante $\lambda(\sigma) = \lambda_0$, a solução analítica para o modelo clássico (2.3.1) é representada por uma onda de concentração de partículas em suspensão que se move com a velocidade média do fluido percolante. Ou seja, para $x_D < t_D$, tem-se:

$$C(x_D, t_D) = e^{-\lambda_0 x_D} \quad (2.3.5)$$

$$\sigma(x_D, t_D) = \lambda_0 \phi(t_D - x_D) e^{-\lambda_0 x_D} . \quad (2.3.6)$$

As concentrações de partículas capturadas e suspensas são iguais a zero na frente do choque de concentração ($x_D > t_D$):

$$C(x_D, t_D) = \sigma(x_D, t_D) = 0. \quad (2.3.7)$$

BEDRIKOVETSKY *et al.* (2004), propuseram uma solução do problema inverso da determinação simultânea dos coeficientes de filtração λ e de dano à formação β .

Após a injeção de um volume poroso ($t_D = 1$ VPI), as partículas alcançam a saída do meio poroso ($x_D = 1$), ou seja:

$$C(1, t_D) = \begin{cases} 0, & t_D < 1 \\ e^{-\lambda_0}, & t_D \geq 1 \end{cases} \quad (2.3.8)$$

A Equação (2.3.8) mostra que a concentração na saída do reservatório permanece constante com o tempo. De acordo com a equação da continuidade (2.3.1), as partículas são transportadas com uma velocidade média igual a do fluido que as transporta.

Vários autores (HERZIG *et al.*, 1970, IVES, 1963, BEDRIKOVETSKY *et al.*, 2004) discutem diferentes formas para o coeficiente de filtração em função da concentração de partículas capturadas ($\lambda = \lambda(\sigma)$) e propõem soluções analíticas

explícitas para alguns casos particulares. BEDRIKOVETSKY *et al.* (2001) propõem um método geral para a solução do sistema de equações (2.3.1).

A descrição de modelo clássico de filtração profunda permite concluir que os efeitos básicos para a reinjeção de água produzida (oleosa), na presença de óleo residual, não foram levados em consideração.

2.4 Injeção de Emulsão/Suspensões em Testemunhos Contendo Óleo Residual

Encontramos poucos trabalhos da literatura que tratam da filtração profunda em testemunhos levando em consideração o óleo residual. Dos trabalhos com injeção de emulsão, o principal foco é o aumento do fator de recuperação de óleo (JOHNSON, 1975, FRENCH *et.al.*, 1986).

SOO e RADKE (1984) efetuaram injeção de emulsão, com baixa concentração de partículas oleosas, em testemunhos sem óleo ($S_w=100\%$). Concluíram que o principal mecanismo de captura das partículas oleosas é a exclusão por tamanho.

SCHMIDT (1982) e SCHMIDT *et.al.* (1984) efetuaram diversos testes de injeção de emulsão, com baixa concentração de partículas oleosas, em testemunhos sem óleo ($S_w=100\%$) e com óleo, em diversas saturações, com o objetivo de estudar o aumento do fator de recuperação de óleo pela injeção de emulsão. Efetuaram diversos testes de injeções de emulsão com partículas com tamanho médio diferente e mostraram que os fatores coeficiente de filtração (λ), deposição máxima (σ_m) e coeficiente dano à formação (β) variam com o tamanho da gota injetada para um mesmo testemunho. Também, mostraram que a queda de permeabilidade é maior quando há óleo residual.

Taber, Chatzis, Morrow entre outros apresentaram vários estudos sobre a mobilização de óleo residual, especialmente sobre a relação entre o óleo residual e a CDC (TABER, 1969, MORROW *et. al*, 1988, CHATZIS *et.al.*, 1983, 1988, CHATZIS e MORROW, 1984, DELSHAD, *et. al*, 1986, ABRAMS, 1975, STEGEMEIER, 1974, ARIOLA *et. al.*, 1983).

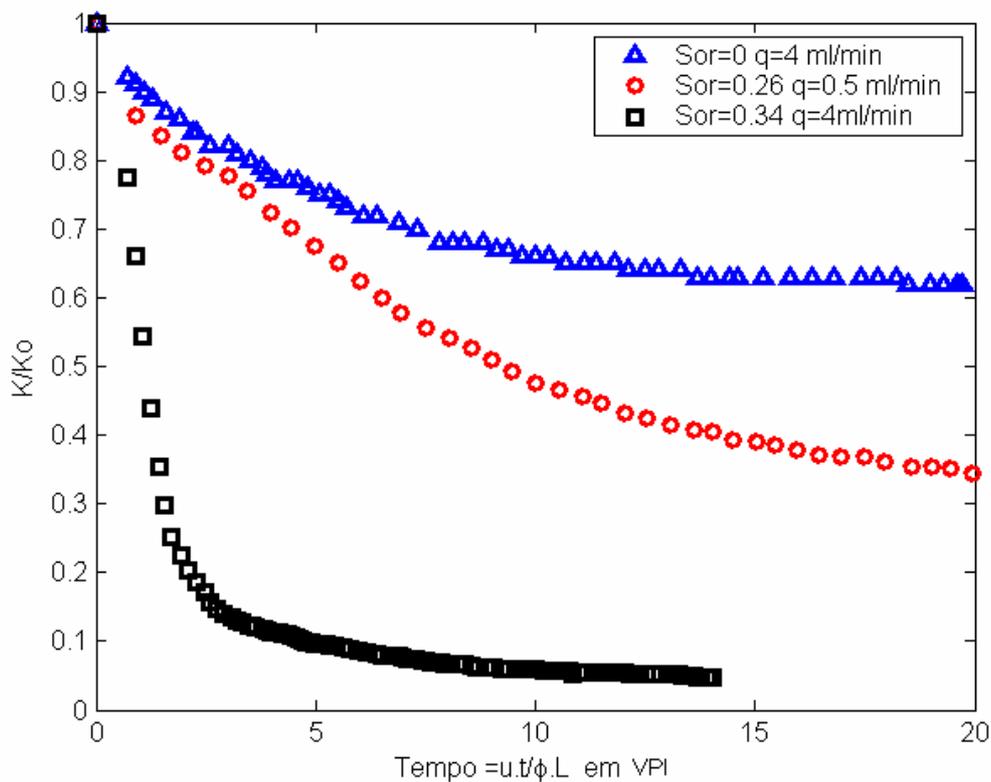
KHAMBHARATANA (1993) e KHAMBHARATANA *et. al.* (1998) injetaram macro-emulsão em testemunhos contendo óleo residual com o objetivo de aumentar o fator de recuperação.

ALI e CURRIE (2005) , ALI, CURRIE e SALMAN (2005), AL-ABDUWANI *et. al.* (2005) injetaram partículas sólidas de hematita em testemunhos com Sw a 100% e com óleo residual para estudar os efeitos da presença de óleo residual no meio poroso, investigando o perfil de deposição e a queda de permeabilidade.

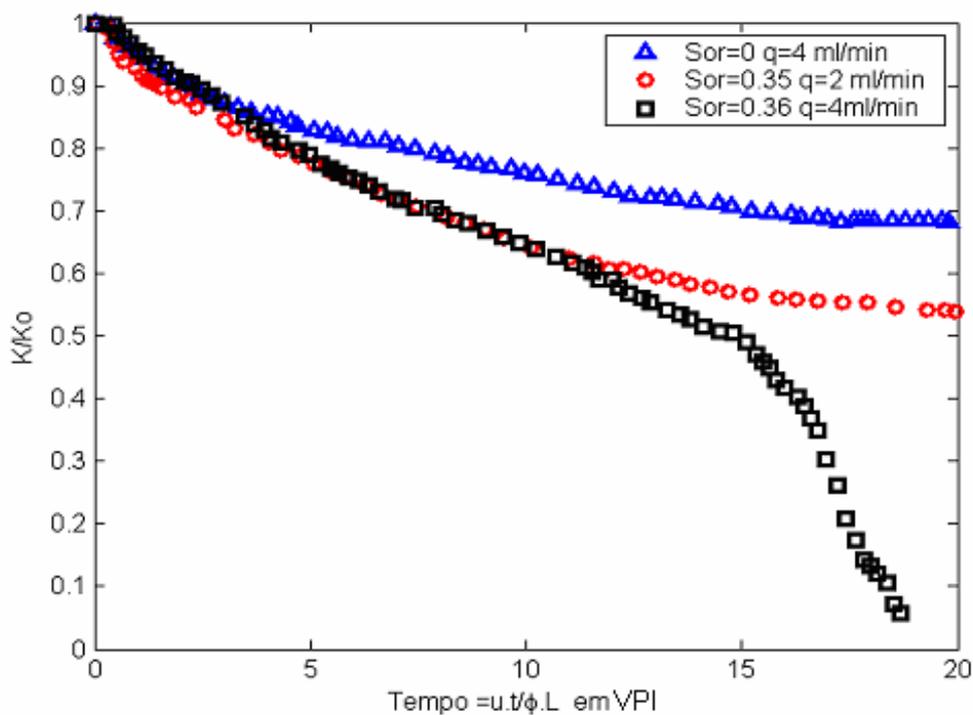
AL-RIYAMY e SHARMA (2004) injetaram emulsão óleo/água contendo partículas sólidas (CaCO_3) em testemunhos contendo óleo residual e ZHANG e TODD (1993) injetaram emulsão contendo partículas de alumina (Al_2O_3) com o objetivo de estudar o dano à formação causado pela injeção de água produzida.

JANSEN (2000) estudou os efeitos da mobilização do óleo residual com a injeção de mistura óleo/água em alta velocidade. O objetivo era o estudo da emulsificação do óleo quando a água injetada chega ao poço produtor.

MENDEZ (1999) efetuou a injeção de emulsão em testemunhos com e sem óleo residual (Fig. 2-6). Ela mostra que a queda de permeabilidade é maior nos testemunhos contendo óleo residual para a injeção da mesma emulsão e que esta queda varia com a concentração, velocidade de injeção, tipo de óleo e quantidade de surfactante. Também, mostra que a concentração de gotas em amostras coletadas em três pontos do testemunho (dois pontos intermediários e na saída) é maior que a injetada em até 50 vezes.



a)



b)

Figura 2-6 – Redução da permeabilidade normalizada pela permeabilidade inicial devido à injeção de emulsão água/óleo ($C^0=1000$ ppm) para três testes em testemunhos semelhantes (Berea) com e sem óleo residual utilizando óleo Prudhoe-Bay (a) e Brent (b) (MENDEZ, 1999) (maiores detalhes no item 5.1)

3. Modelo Matemático de Filtração Profunda com Efeitos da Presença de Óleo Residual

3.1 Formulação do Problema

Vamos discutir a filtração profunda da injeção de água contendo partículas oleosas em reservatórios de petróleo. Nós estamos interessados no processo de dano à formação. O dano é causado pela captura de partículas pelo meio poroso na vizinhança do poço injetor. O raio deste dano r_d é, comumente, algumas vezes o raio do poço e é chamado de zona de dano. A deposição de partículas fora da zona de dano é, normalmente, desprezada pois não afeta a injetividade da água.

Em um poço injetor de campo marítimo, normalmente injeta-se água do mar para deslocar o óleo. Portanto, uma grande quantidade de volumes porosos de água passa pela zona de dano durante o tempo de injeção de água do mar. Assim, podemos assumir a existência de uma saturação de óleo residual na vizinhança do poço após a injeção de água do mar e antes da reinjeção de água produzida que contem partículas de óleo.

A captura de partículas pelo meio poroso causa perda na permeabilidade e conseqüente aumento do gradiente de pressão, quando a taxa de injeção é mantida (Fig. 3-1b).

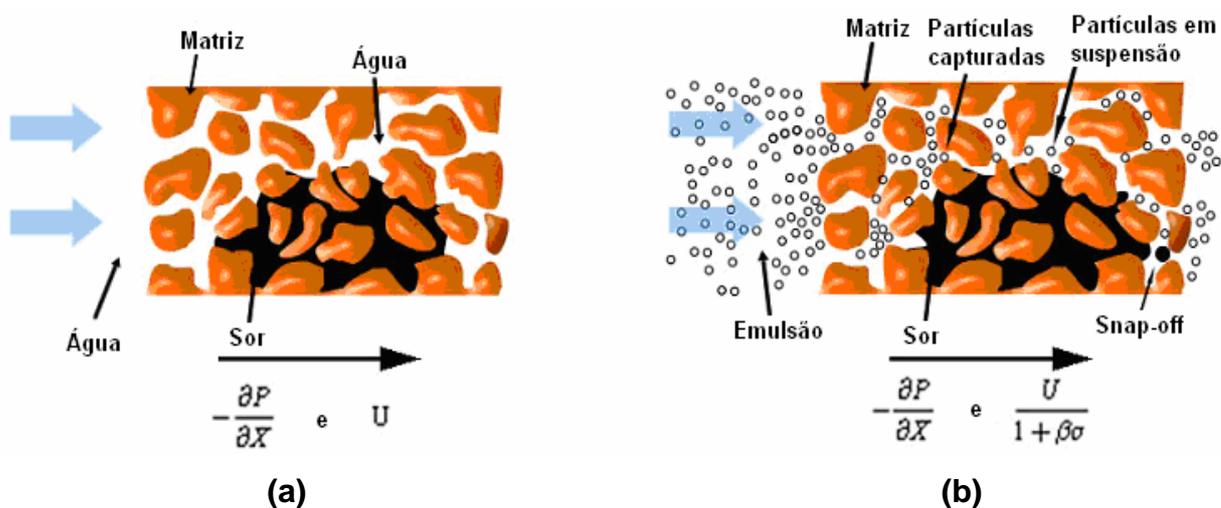


Figura 3-1 - Fluxo de água (a) e Fluxo de emulsão água/óleo (b) no meio poroso

O aumento do gradiente de pressão resulta na mudança do balanço de forças em cada gânglio de óleo residual preso por forças capilares. O gânglio começa a se deslocar, liberando gotas de óleo (*snap-off*), reduzindo, assim, o seu tamanho, diminuindo, portanto, a pressão sobre ele até se restabelecer o equilíbrio com a pressão capilar (Fig. 3-2). Neste momento, o gânglio fica imóvel outra vez.

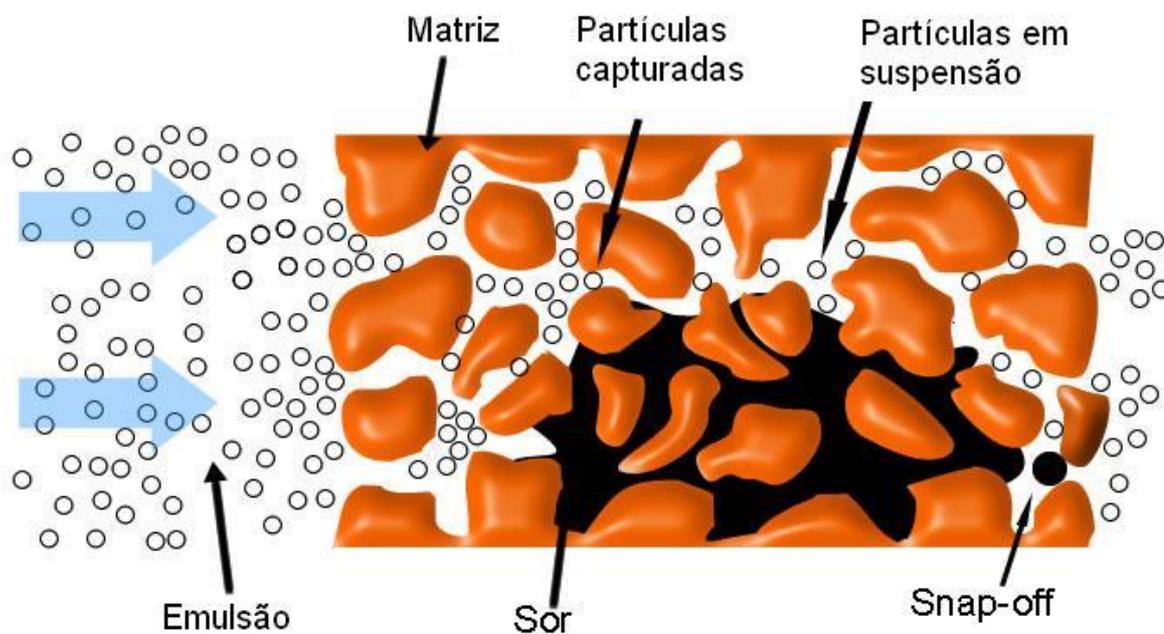


Figura 3-2 - *Snap-off* de partículas de óleo do óleo residual devido ao aumento do gradiente de pressão.

Assim, a injeção de emulsão água/óleo induz a liberação de partículas oleosas pelo óleo residual. Esta liberação de partículas pode afetar a filtração profunda de partículas de óleo em suspensão injetadas e, conseqüentemente, alterar a injetividade do poço.

A predição do declínio da injetividade durante a reinjeção de água produzida na presença de óleo residual pode ser alcançada pela modelagem matemática.

O objetivo principal desta tese é deduzir um modelo analítico para a filtração profunda na presença de óleo residual levando em consideração a liberação de partículas de óleo. Além disso, propor procedimentos para a validação do modelo.

3.2 Lema sobre os Efeitos Capilares de Partículas Capturadas pelo Meio Poroso com Óleo Residual

Consideremos um fluxo de água contendo partículas oleosas em um meio poroso contendo óleo residual onde haverá captura de partículas. Cada gânglio de óleo estará inicialmente imóvel devido ao balanço das forças capilares e da pressão sobre o gânglio (Fig. 3-1a). Este balanço determina a função saturação de óleo residual versus número capilar (LAKE, 1989, CHATZIS e MORROW, 1984, CHATZIS *et al.*, 1983, ROOF, 1970, KOVSCEK e RADKE, 1996).

$$s_{or} = g(N_c, 0) \quad (3.2.1)$$

$$N_c = \frac{U\mu_w}{\sigma_{wo}} \quad (3.2.2)$$

O gráfico desta função (3.2.1), chamada curva de dessaturação capilar (CDC), é apresentado na Fig. 3-3.

Vamos assumir, também, o caso onde temos o mesmo gradiente de pressão, mas com injeção de água pura (sem partículas). Assim, o balanço de forças nos gânglios de óleo residual é o mesmo, em ambos os casos, com e sem partículas. Portanto, a saturação de óleo residual é também a mesma em ambos os casos (Fig. 3-1a,b). Esta é a principal hipótese para o processo de liberação de partículas de óleo pelo óleo residual (MENDEZ, 1999).

A deposição de σ partículas resulta na redução da permeabilidade em $1+\beta\sigma$ vezes. Sob o mesmo gradiente de pressão, velocidade e número capilar, o fluxo com a presença e captura de partículas é $1+\beta\sigma$ vezes menor que o fluxo sem partículas (PANG e SHARMA, 1997, WENBERG e SHARMA, 1997, ALVAREZ *et al.*, 2006). Então, a saturação de óleo residual em um fluxo sem a captura de partículas e com um número capilar N_c , é igual ao fluxo com captura de partículas com um número capilar $N_c/(1+\beta\sigma)$:

$$s_{or} = g(N_c, \sigma) = g\left(\frac{N_c}{1+\beta\sigma}, 0\right) \quad (3.2.3)$$

O apêndice 'A' apresenta em detalhes os cálculos para a função 3.2.3.

O excesso de óleo residual, formado pelo aumento do gradiente de pressão é liberado por *snap-off* (Fig. 3-2).

Para calcular a saturação de óleo residual num fluxo onde há captura de partículas para um dado número capilar N_c , multiplicamos N_c por $1+\beta\sigma$ e teremos o correspondente valor na CDC (Fig. 3-3).

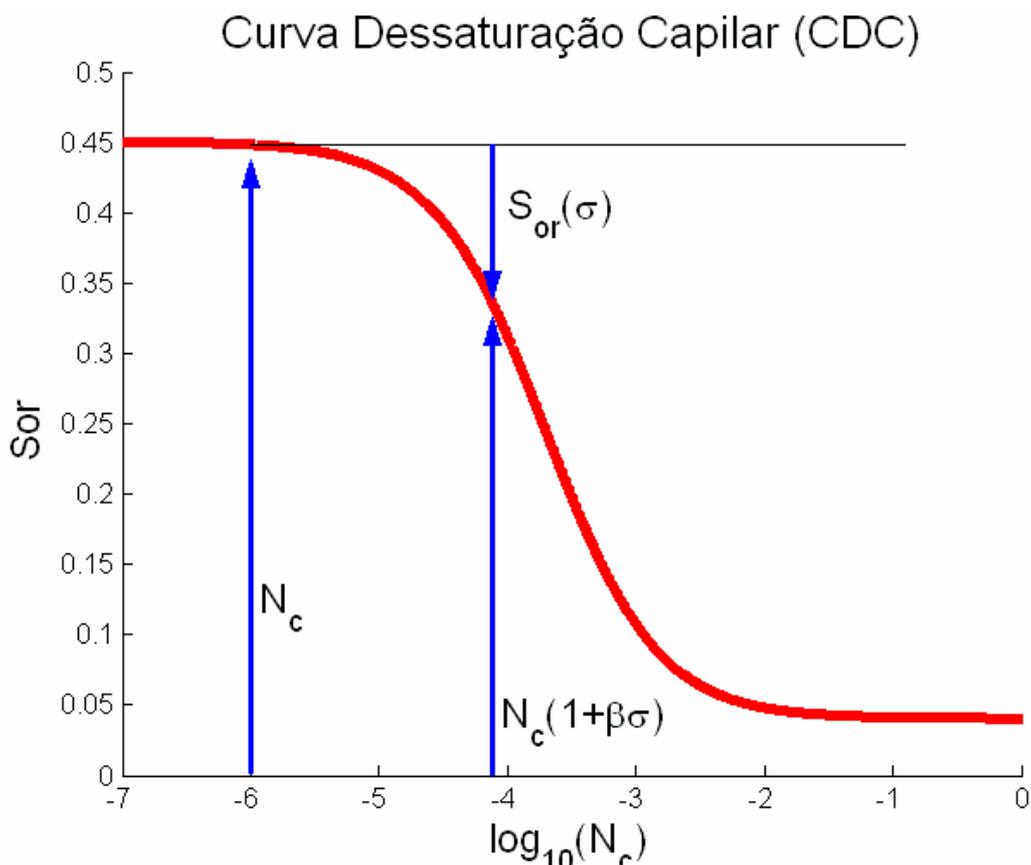


Figura 3-3 - Determinação da quantidade de partículas de óleo liberadas pelo óleo residual a partir da CDC.

Com este procedimento, podemos calcular, também, a quantidade de óleo residual liberada numa injeção de água com partículas. Após a injeção de partículas em suspensão, uma concentração σ é depositada. O gradiente de pressão aumenta devido à resistência hidráulica adicional. A quantidade de partículas oleosas liberadas da fase óleo imóvel $s_{or}(\sigma)$ é:

$$s_{or}(\sigma) = s_{or}(N_c, 0) - s_{or}(N_c(1 + \beta\sigma), 0) \quad (3.2.4)$$

Esta quantidade pode ser determinada graficamente (Fig. 3-3).

3.3 Equação do Balanço de Massa

O balanço de massa total (3.3.1), para o óleo contido no testemunho, é dado pela quantidade de gotas de óleo em suspensão, gotas de óleo capturadas e gânglios de óleo residual :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi(1 - s_{or})c + \sigma + \phi s_{or}) + U \frac{\partial c}{\partial x} = 0 \quad (3.3.1)$$

Assumimos que o óleo residual está imóvel e que as partículas em suspensão movem-se com a velocidade do fluxo de água.

3.4 Cinética de Captura

A taxa de deposição de partículas é proporcional ao fluxo de partículas em suspensão (3.4.1). O coeficiente de proporcionalidade (coeficiente de filtração) depende da concentração de partículas capturadas (ALVAREZ *et al.*, 2006).

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \lambda'(\sigma)Uc \quad (3.4.1)$$

Aqui, desprezamos o efeito do óleo residual no coeficiente de filtração.

3.5 Lei de Darcy Modificada

A retenção de partículas, com concentração σ , resulta em uma redução da permeabilidade em $1+\beta\sigma$ vezes (PANG e SHARMA, 1997, WENNBERG e SHARMA, 1997, BEDRIKOVETSKY *et al.*, 2001).

$$U = -\frac{kk_{rw}(s_{or})}{\mu_w(1+\beta\sigma)} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3.5.1)$$

Estamos assumindo a mesma redução da permeabilidade com a presença de óleo residual (3.5.1).

3.6 Saturação de Óleo Residual

A saturação de óleo residual em fluxo onde há captura de partículas é obtida da CDC pela multiplicação do número capilar por $1+\beta\sigma$, ver equação 3.2.3:

$$s_{or} = g(N_c(1+\beta\sigma)) \quad (3.6.1)$$

3.7 Parâmetros Adimensionais

Introduzindo os parâmetros adimensionais abaixo e efetuando a substituição nas equações (3.3.1) e (3.4.1) temos um sistema de duas equações e duas incógnitas (concentração de partículas em suspensão adimensional e concentração de partículas capturadas adimensional, C e S respectivamente), equações (3.7.1) e (3.7.2):

$$x_D = \frac{x}{L} ; \quad t_D = \frac{U t}{\phi L} ; \quad C = \frac{c}{c^0} ; \quad S = \frac{\sigma}{\phi c^0} ;$$

$$s = \frac{s_{or}}{c^0} ; \quad \lambda = \lambda' L ; \quad P = \frac{k}{\mu_w UL} p$$

$$\frac{\partial}{\partial t_D} (C(1 - c^0 s(S)) + S + s(S)) + \frac{\partial C}{\partial x_D} = 0 \quad (3.7.1)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t_D} = \lambda(S)C \quad (3.7.2)$$

Estas equações são separadas da equação da pressão adimensional:

$$1 = - \frac{k_{rw}(s(S))}{1 + \beta c^0 \phi S} \frac{\partial P}{\partial x_D} \quad (3.7.3)$$

O sistema completo é apresentado no apêndice 'B'.

3.8 Formulação do Problema Inicial e de Contorno

O problema de valor inicial e de contorno corresponde ao da reinjeção de água produzida (PWRI, sigla em inglês) com fluxo Q (número capilar N_c) e com uma concentração constante c^0 de partículas oleosas, em um testemunho contendo óleo residual, sem partículas em suspensão, no qual se injetou água "pura" com fluxo Q , por muitos volumes porosos, até a estabilização do óleo residual.

Portanto, temos, no tempo inicial da injeção de água oleosa ($t_D=0$), tanto a concentração de partículas em suspensão como a concentração de partículas capturadas iguais a zero. A quantidade de óleo residual é igual ao óleo residual inicial adimensional:

$$t_D = 0 : C = S = 0, s = \frac{s_{or}}{c^0} \quad (3.8.1)$$

Como condição de contorno temos que a concentração adimensional é constante e igual à unidade na face de injeção do testemunho:

$$x_D = 0 : C = 1 \quad (3.8.2)$$

4. Modelo Analítico de Filtração Profunda com Efeitos da Presença de Óleo Residual

O problema da injeção de emulsão óleo/água em testemunhos saturados de água, sem partículas em suspensão e com a presença de óleo residual, possui solução analítica exata. A forma específica da equação de cinética de captura (3.7.2) propicia a introdução da função potencial para a concentração de partículas no testemunho (4.1) (HERZIG *et al.*, 1970, BEDRIKOVETSKY *et al.*, 2001). A substituição do potencial na equação do balanço de massa a reduz em uma ordem, o que nos leva a uma solução exata utilizando o método das características (ver detalhes no apêndice 'C').

$$C = \frac{1}{\lambda(S)} \frac{\partial S}{\partial t_D} = \frac{\partial \Phi(S)}{\partial t_D} \quad (4.1)$$

A solução é apresentada por um sistema de duas equações transcendentais (4.2, 4.3) com duas incógnitas: concentração de partículas capturadas $S(x_D, t_D)$ e o seu valor na entrada do testemunho $S(0, t_D')$. A concentração da suspensão no testemunho é determinada pela equação (4.1).

$$x_D = \int_{s(0,t_D)}^s \frac{dS}{\lambda(S)[s(0) - S - s(S)]} \quad (4.2)$$

$$t_D = \int_{s(0,t_D)}^s \frac{(1 - c^0 s(S))dS}{\lambda(S)[s(0) - S - s(S)]} + \int_0^{s(0,t_D)} \frac{dS}{\lambda(S)} \quad (4.3)$$

As expressões do lado direito das equações (4.2 e 4.3) contêm integrais para uma função arbitrária da função de filtração $\lambda(S)$. No caso particular de baixas concentrações da suspensão, onde a captura de partículas não afeta significativamente o espaço poroso (coeficiente de filtração constante), a integral pode ser calculada explicitamente, o que simplifica o cálculo numérico da solução de (4.2 e 4.3). A forma final do sistema de equações transcendentais que resolve o problema para o coeficiente de filtração constante é dada por (ver detalhes no apêndice 'D'):

$$x_D = \frac{D}{\lambda A} \ln \frac{S}{S(0,t_D)} - \frac{D+A}{\lambda A} \ln \frac{(A-S)}{A-S(0,t_D)} \quad (4.4)$$

$$t_D = \frac{D - s_{or0}B}{\lambda A} \ln \left(\frac{S}{S(0,t_D)} \right) - \frac{(D+A) - s_{or0}(B+A)}{\lambda A} \left(\ln \left(\frac{A-S}{A-S(0,t_D)} \right) \right) + \frac{S(0,t_D)}{\lambda} \quad (4.5)$$

onde B, D e A são dadas por:

$$A = \frac{(s_{or1} - s_{or0})}{(1 + MN_c)c^0} - \frac{1 + MN_c}{MN_c \beta \phi c^0} \quad (4.6)$$

$$B = \frac{s_{or0}MN_c + s_{or1}}{s_{or0}MN_c \beta \phi c^0} \quad (4.7)$$

$$D = \frac{(1 + MN_c)}{MN_c \beta \phi c^0} \quad (4.8)$$

O sistema de equações (4.2 e 4.3), também, pode ser simplificado para o caso de coeficiente de filtração linear de Langmuir (4.9) onde a captura de partículas altera o espaço poroso, mas as partículas não interagem entre si.

$$\lambda(S) = \lambda_0 \left(1 - \frac{S}{S_m} \right) \quad (4.9)$$

A forma final do sistema de equações transcendentais que resolve este problema é dada por (Ver detalhes no apêndice 'E'):

$$x_D = \frac{D}{\lambda_0 A} \left(\ln \left(\frac{S}{S(0, t_D)} \right) \right) + \frac{D + S_m}{\lambda_0 (S_m - A)} \left(\ln \left(\frac{S_m - S}{S_m - S(0, t_D)} \right) \right) - \frac{S_m}{\lambda_0} \frac{D + A}{A(S_m - A)} \left(\ln \left(\frac{A - S}{A - S(0, t_D)} \right) \right) \quad (4.10)$$

$$t_D = \frac{D - s_{or0} B}{\lambda_0 A} \left(\ln \left(\frac{S}{S(0, t_D)} \right) \right) + \frac{(D - s_{or0} B) + S_m (1 - s_{or0})}{\lambda_0 (S_m - A)} \left(\ln \left(\frac{S_m - S}{S_m - S(0, t_D)} \right) \right) - \frac{S_m [(D - s_{or0} B) + A(1 - s_{or0})]}{\lambda A (S_m - A)} \left(\ln \left(\frac{A - S}{A - S(0, t_D)} \right) \right) + \frac{S_m}{\lambda_0} \left(\ln \left(\frac{S_m - S(0, t_D)}{S_m} \right) \right) \quad (4.11)$$

4.1 Estrutura do Fluxo da Emulsão no Meio Poroso

A frente de partículas em suspensão (frente de onda) é dada por:

$$x_D = \frac{t_D}{1 - c^0 s(0)} \quad (4.1.1)$$

para $x_D > \frac{t_D}{1 - c^0 s(0)}$, ou seja, além da frente da suspensão, temos água sem

partículas em suspensão, o óleo residual é igual ao valor inicial e não há nenhuma partícula capturada (Fig. 4-1)

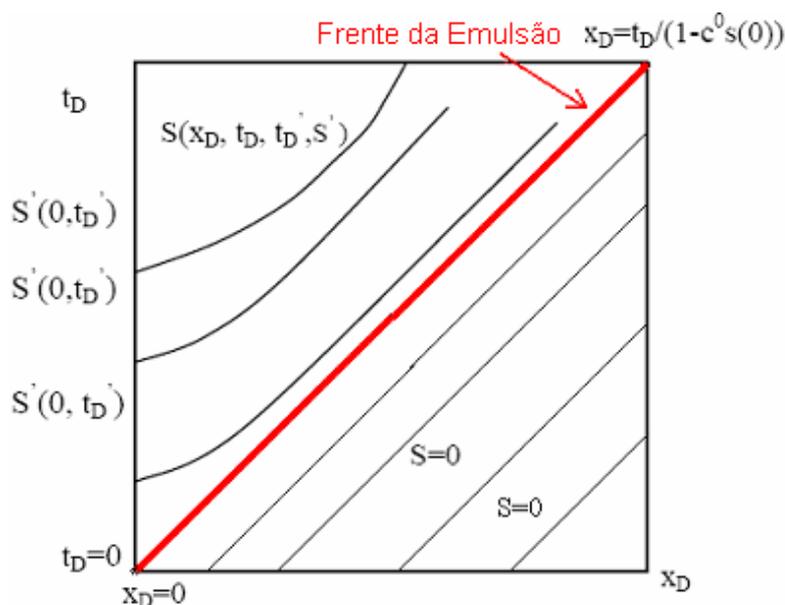


Figura 4-1 - Trajetória das partículas no testemunho (características).

A concentração das partículas em suspensão na frente de onda sofre um choque no momento da chegada na saída do testemunho (*breakthrough*) e, posteriormente, varia não-monotonicamente:

$$C\left(\frac{t_D}{1 - c^0 s(0)}, t_D\right) = G \left\{ 1 - \frac{1}{(1 - G)} \exp\left[\frac{\lambda(0)[s'(0) + 1]}{1 - c^0 s(0)} t_D\right] \right\}^{-1} \quad (4.1.2)$$

$$\text{onde } G = \frac{s'(0) + 1}{c^0 s'(0)} ; s'(S) = \frac{\partial s(S)}{\partial S} \text{ e } s'(0) = s'(S) \text{ p/ } S=0.$$

A concentração no efluente é zero antes do *breakthrough* e é igual a (4.1.2) imediatamente após o *breakthrough*. A partir daí, a concentração do efluente tende a crescer devido à liberação das gotas por *snap-off* e, posteriormente, tende a diminuir quando o óleo residual alcança o mínimo.

Se a função de filtração é linear, a liberação de partículas cessa após a concentração de partículas capturadas alcançar o máximo σ_m e a concentração do efluente tende para a concentração da injeção.

A saturação de óleo residual, bem como a concentração de partículas capturadas, são contínuas através da frente de onda.

As trajetórias das partículas (curvas características) são curvilíneas atrás da frente de onda (Fig. 4-1).

A concentração das partículas em suspensão varia de 1 (adimensional) na entrada do testemunho até o valor (4.1.2) na frente de onda, podendo alcançar valores maiores ou menores que 1 neste intervalo, dependendo da liberação de gotas por *snap-off*.

As curvas de concentração do efluente no tempo (breakthrough) e de deposição *versus* distância apresentam claramente dois tipos de regime: domínio da deposição de partículas e domínio da liberação de gotas pelo óleo residual (*snap-off*).

Com velocidades mais baixas, vemos o predomínio da deposição de partículas sobre o *snap-off*, onde o comportamento das curvas é semelhante ao comportamento das curvas apresentadas pelo modelo clássico.

Com velocidades mais altas, após o número capilar crítico, o *snap-off* é maior que o depósito de partículas e o sistema apresenta comportamento diferente do modelo clássico. As curvas de concentração do efluente apresentam concentrações maiores que a concentração da emulsão injetada (Fig. 4-4 e 4-9) e a deposição de partículas cresce da saída do testemunho para a entrada de maneira inversa à curva do modelo clássico (Fig. 4-6 e 4-11).

No ponto de equilíbrio entre a deposição e liberação de partículas, temos a concentração no efluente igual à concentração da emulsão, embora o processo de deposição continue normalmente. Neste ponto, temos também, uma deposição constante ao longo do testemunho de valor igual à deposição na entrada do testemunho.

O ponto de equilíbrio pode ser determinado considerando a concentração adimensional igual a um na equação do balanço de massas (3.7.1), onde encontramos:

$$\frac{ds(S)}{dS} = -\frac{1}{1-c^0} \quad (4.1.3)$$

Graficamente, este ponto é apresentado na Figura 4-2.

Lema: O regime com o perfil uniforme da retenção de partículas ocorre para o ponto da CDC com tangente $(1-c^0)^{-1}$. Neste caso, a concentração não muda, ou seja, $C(x_D, t_D)=1$.

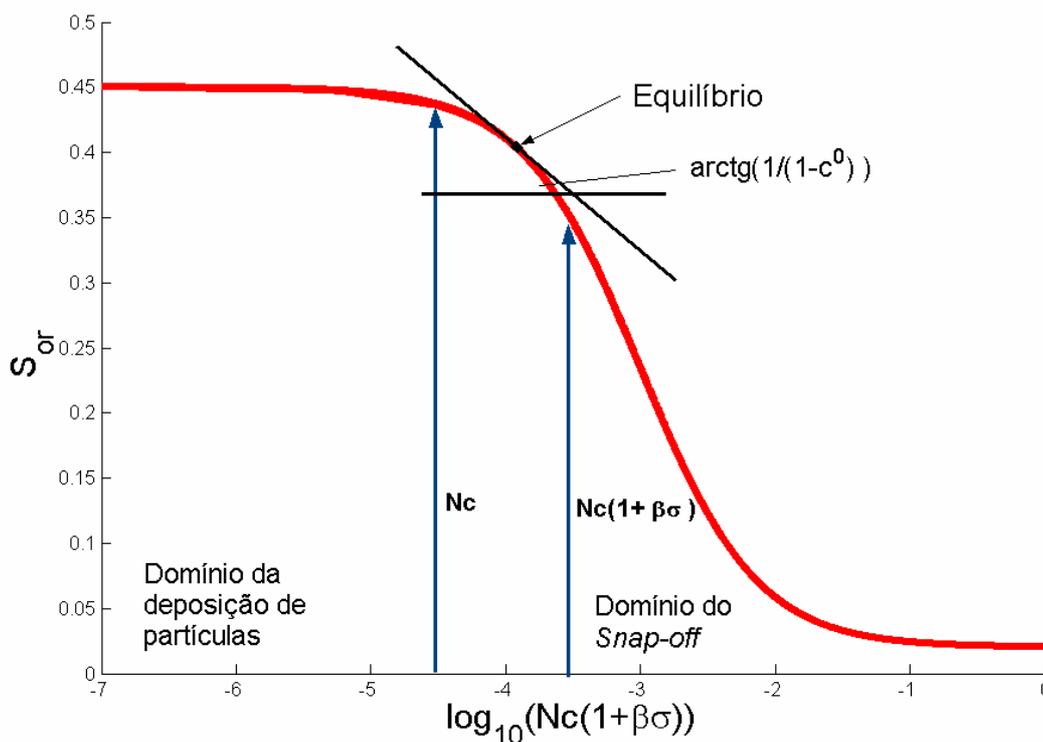


Figura 4-2 Regiões de domínio da deposição e do *Snap-off*

4.2 Modelo Analítico para o Coeficiente de Filtração Constante: Resultados da Modelagem

No apêndice 'D' apresentamos a solução analítica para o caso onde $\lambda(S)$ é constante. A solução é dada por duas equações transcendentais (4.4) e (4.5) para duas variáveis desconhecidas $S(x_D, t_D)$ e $S(0, t'_D)$.

Utilizando métodos de solução numérica para a solução de sistemas de equações não lineares encontramos a solução para $S(x_D, t_D)$.

Para encontrar a solução para a concentração $C(x_D, t_D)$, utilizamos (3.7.2) e temos, portanto:

$$C = \frac{1}{\lambda} \frac{\partial S}{\partial T} \quad (4.2.1)$$

A curva da concentração $C(x_D, t_D)$ é calculada numericamente a partir de (4.2.1) e $S(x_D, t_D)$.

A curva do gradiente de pressão no testemunho $\Delta P(x_D, t_D)$ é calculada numericamente a partir de :

$$\Delta P = \int_0^1 - \frac{\partial P}{\partial x_D} dx_D = \int_0^1 \frac{1 + \beta \phi c^0 S}{k_{rw}(s(S))} dx_D \quad (4.2.2)$$

onde a permeabilidade relativa é dada por (LAKE, 1989),

$$k_{rw}(s(S)) = k_{rw}(s_{or0}) \left(\frac{1 - c^0 s(S) - s_{wi}}{1 - s_{wi} - s_{or0}} \right)^n \quad (4.2.3)$$

e da solução para $S(x_D, t_D)$.

Apresentamos e analisamos abaixo alguns resultados utilizando dados hipotéticos. Todos os cálculos e gráficos foram efetuados com o software MATLAB.

Utilizamos para os cálculos desta e da próxima seção os seguintes dados hipotéticos:

- a) permeabilidade $k=300$ md
- b) porosidade $\phi=0,18$
- c) comprimento do testemunho $L=0,1$ m e raio $r=0,01$ m
- d) permeabilidade relativa água/óleo $k_{rw}(s_{or})=0,25$
- e) tensão interfacial água/óleo $\sigma=50$ dyne/cm
- f) viscosidade da água $\mu_w=1$ cp
- g) coeficiente dano de formação $\beta=500$
- h) coeficiente de filtração constante $\lambda=20$ 1/m
- i) concentração na entrada do testemunho $c^0=200$ ppm
- j) CDC apresentada na Figura 4-3.

Vamos mostrar, a partir da modelagem para o coeficiente de filtração constante, o efeito da velocidade de fluxo nas curvas:

- a) concentração adimensional do efluente *versus* tempo em volume poroso injetado (VPI). Figura 4-4.

- b) deposição de partículas adimensional *versus* tempo em VPI na saída do testemunho. Figura 4-5.
- c) deposição de partículas adimensional *versus* distância adimensional no testemunho no tempo $t=100\text{VPI}$. Figura 4-6.
- d) permeabilidade do testemunho normalizada pela permeabilidade inicial *versus* tempo em VPI. Figura 4-7.
- e) pressão adimensional *versus* tempo em VPI. Figura 4-8.

As curvas são apresentadas para quatro N_c diferentes (quatro fluxos constantes e distintos) correspondentes às posições marcadas na CDC (Figura 4-3). Além das quatro curvas, também é apresentada, para efeitos comparativos, uma curva com injeção da mesma emulsão ($c^0=200\text{ppm}$) para a situação onde $s_{or}=0$ ($s_w=100\%$ → testemunho sem óleo residual) calculada pelo modelo clássico.

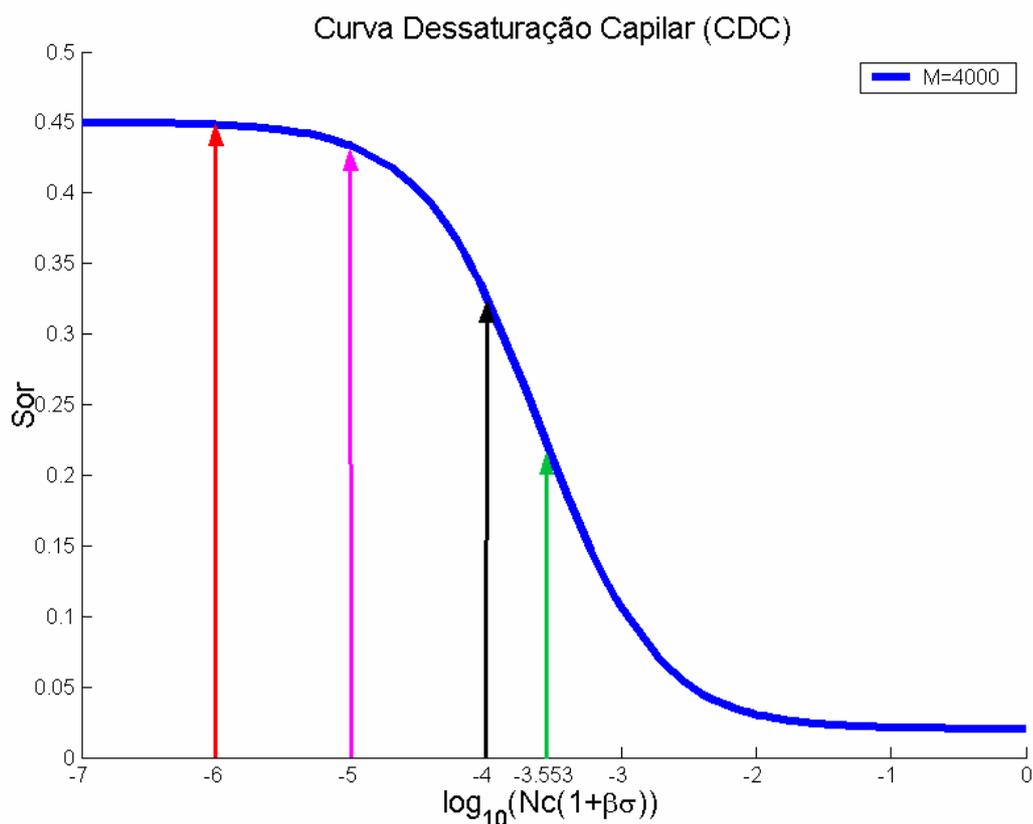


Figura 4-3 – CDC utilizada para a análise do modelo com λ constante

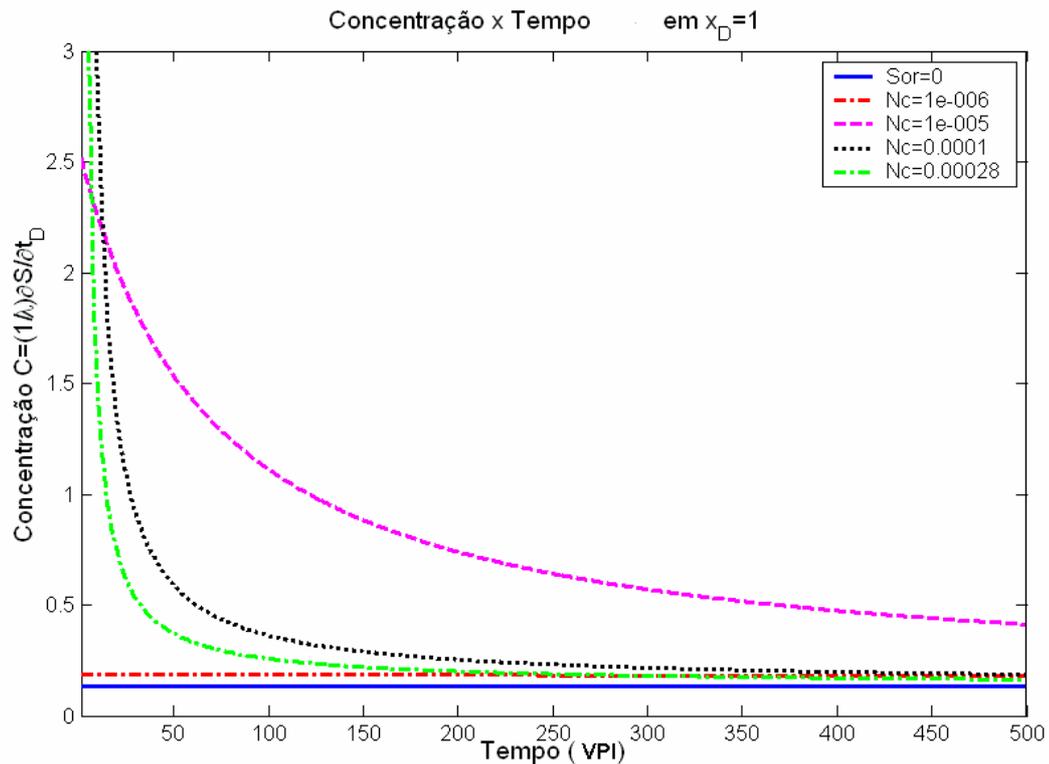


Figura 4-4 – Concentração adimensional no efluente *versus* tempo para 4 velocidades diferentes com λ constante.

A Figura 4-4 mostra a curva de concentração do efluente para altas e baixas velocidades. A concentração é constante e igual a $e^{-\lambda}$ na ausência de óleo residual. Observamos uma dependência não-monótona da concentração do efluente com o número capilar. Quando a velocidade é alta, a quantidade de óleo residual é menor. No entanto, quanto mais alta é a velocidade, maior é a quantidade de gotas liberadas devido ao aumento do gradiente de pressão. Esta competição leva a esta dependência não monótona. Quando se passa da parte côncava para a parte convexa da CDC, o processo se inverte.

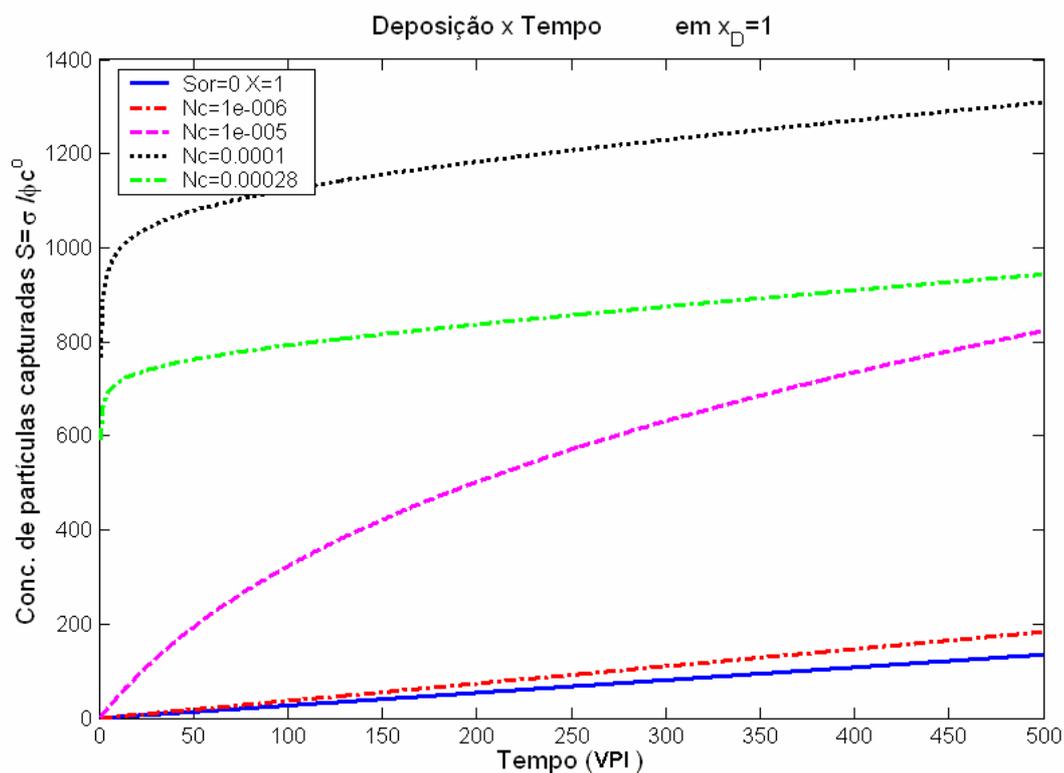


Figura 4-5 – Deposição adimensional *versus* tempo para λ constante.

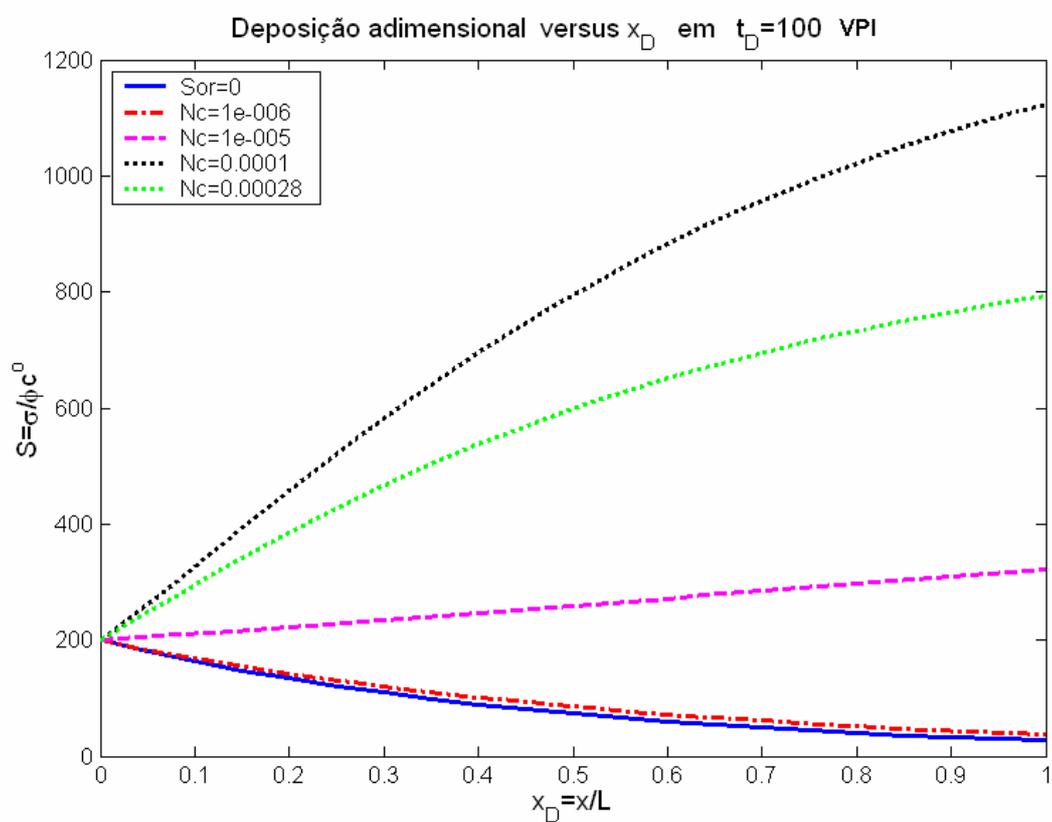


Figura 4-6 – Deposição *versus* distância (adimensionais) no tempo=100VPI para λ constante.

O intervalo apresentado nas simulações, representa a variação do número capilar de 10^{-6} a 10^{-3} . Esta faixa de velocidades abrange tanto a injeção de água (menores velocidades, com N_c variando de 10^{-6} a 10^{-5}) quanto as velocidades no poço produtor (maiores velocidades, com N_c alcançando 10^{-4}).

Trabalhando apenas na parte côncava da CDC vemos que, quanto maior é o N_c , mais alta é a variação do óleo residual devido à variação do N_c . Portanto, quanto maior a liberação de partículas, maior é a velocidade nos poros. Quanto mais alta é a velocidade, maior é a quantidade depositada num mesmo tempo. Quando se passa para a parte convexa da CDC, o processo se inverte (Figuras 4-5 e 4-6).

A Figura 4-6 mostra que a concentração de partículas capturadas diminui ao longo do testemunho para baixas velocidades e aumenta para altas velocidades. A mobilização do óleo residual é muito pequena em baixas velocidades, assim, a deposição diminui ao longo do testemunho como acontece com a filtração profunda sem óleo residual (PANG e SHARMA, 1997, WENBERG e SHARMA, 1997, ALVAREZ, *et al.*, 2006). Para altas velocidades, a captura de partículas provoca o *snap-off* de gotas, que, também, são capturadas e provocam mais liberação de partículas.

A Tabela 4.1 mostra o número capilar alcançado, além do óleo residual final, após 500 volumes porosos injetados para cada uma das vazões iniciais. A permeabilidade final nas injeções em vazões mais altas é menor, porque a quantidade de óleo inicial é menor e o deslocamento de óleo é muito grande e rápido, portanto, a maioria das partículas sai no efluente logo no início da injeção (Fig. 4-7 e 4-8).

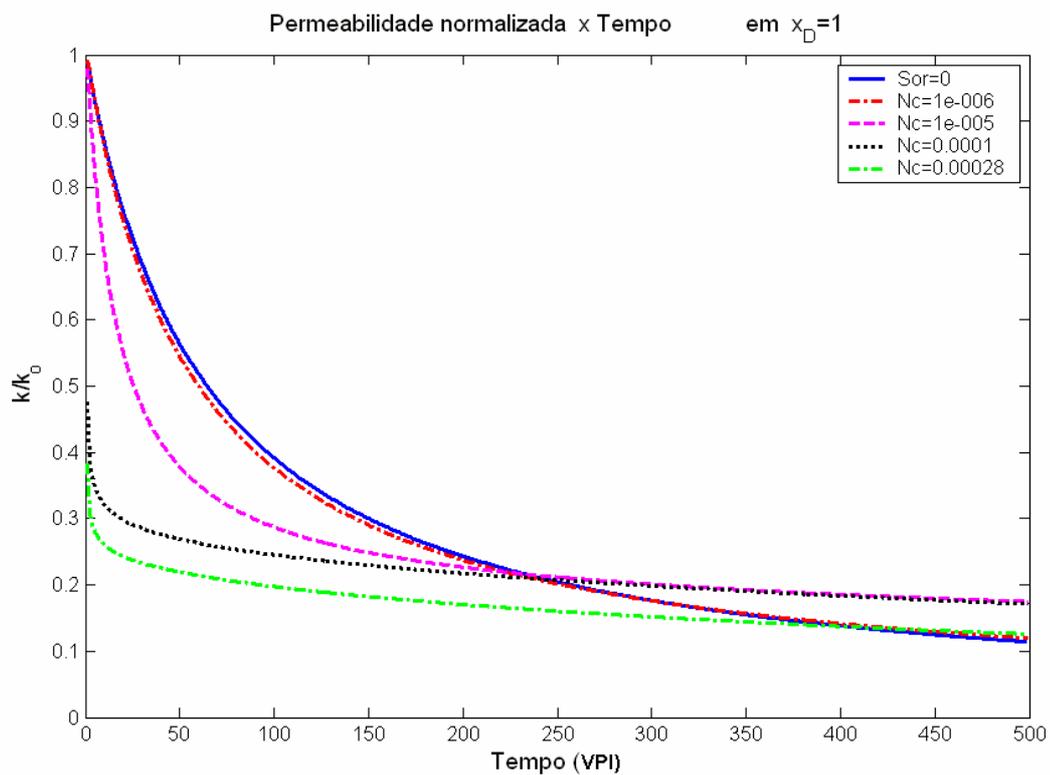


Figura 4-7 – Permeabilidade normalizada *versus* tempo para λ constante.

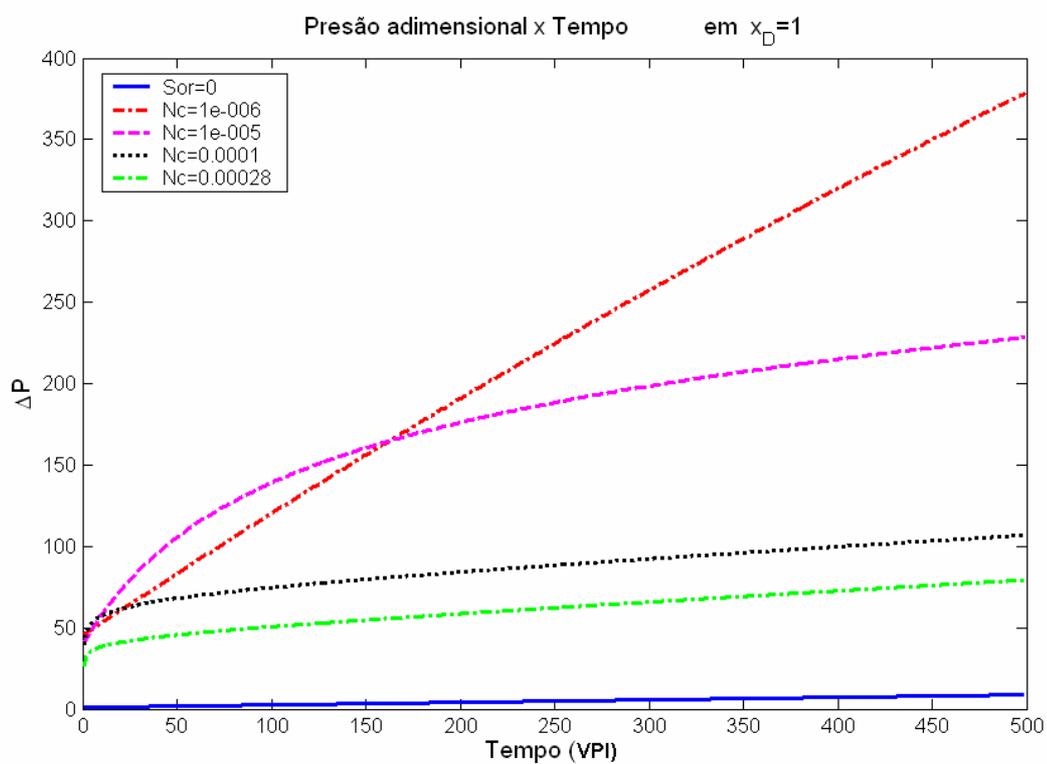


Figura 4-8 – Pressão adimensional *versus* tempo para λ constante.

Tabela 4.1 - Resultados de deslocamento de óleo calculados para λ constante após 500 VPI

Nc	Sor _{inicial}	Nc(1+ $\beta\Phi C_0 S_{final}$) em T=500	Aumento de Nc	Sor _{final}	ΔS_{or}	% óleo deslocado
10^{-6}	0,4482	$4,2946 \cdot 10^{-6}$	4,29	0,4426	0,0056	1,27
10^{-5}	0,4331	$1,5814 \cdot 10^{-4}$	11,58	0,2795	0,1536	35,47
10^{-4}	0,3243	$2,5 \cdot 10^{-3}$	25	0,0506	0,2737	84,37
$2,8 \cdot 10^{-4}$	0,2175	$5 \cdot 10^{-3}$	17,85	0,0308	0,1867	85,84

4.3 Modelo Analítico para Coeficiente de Filtração Linear: Resultados da Modelagem

Este caso corresponde, por exemplo, à injeção de água contendo uma concentração de partículas onde estas são retidas na superfície dos poros independentemente umas das outras, ou seja, não há interação entre as partículas.

A função de filtração pode ser definida como:

$$\lambda(S) = \lambda_0 \left(1 - \frac{S}{S_m} \right) \quad (4.3.1)$$

onde λ_0 é o valor inicial do coeficiente de filtração e S_m é o valor máximo adimensional da concentração de partículas depositada no meio poroso.

No apêndice 'E' apresentamos a solução analítica para este caso onde, também, a solução é dada por duas equações transcendentais (4.10) e (4.11) para duas variáveis desconhecidas $S(x_D, t_D)$ e $S(0, t'_D)$.

Utilizando o mesmo método de solução numérica da seção anterior, encontramos a solução para $S(x_D, t_D)$.

A curva da concentração $C(x_D, t_D)$ é calculada numericamente a partir de (4.3.2) e $S(x_D, t_D)$.

$$C = \lambda_0 \left(1 - \frac{S}{S_m} \right) \frac{\partial S}{\partial t_D} \quad (4.3.2)$$

A curva do gradiente de pressão no testemunho $\Delta P(x_D, t_D)$ é calculada numericamente a partir de (4.2.2), (4.2.3) e da solução para $S(x_D, t_D)$.

Apresentamos e analisamos abaixo alguns resultados utilizando dados hipotéticos. Todos os cálculos e gráficos também foram efetuados com o software MATLAB.

Utilizamos para os cálculos os mesmos dados hipotéticos da seção anterior acrescentado da deposição máxima $\sigma_m=7.2e-3$ correspondendo a $S_m=200$. A CDC utilizada é a da Fig. 4-13.

Vamos mostrar, a partir da modelagem para o coeficiente de filtração linear, o efeito da velocidade de fluxo nas curvas:

- a) concentração adimensional do efluente versus tempo em volume poroso injetado (VPI). Figura 4-9.
- b) deposição de partículas adimensional versus tempo em VPI na saída do testemunho. Figura 4-10.
- c) deposição de partículas versus distância no testemunho adimensionais no tempo $t=100VPI$. Figura 4-11.
- d) permeabilidade normalizada pela permeabilidade inicial do testemunho versus tempo em VPI. Figura 4-12.

As curvas são apresentadas para quatro N_c diferentes (quatro fluxos constantes e distintos) correspondentes aos mesmos valores da seção anterior.

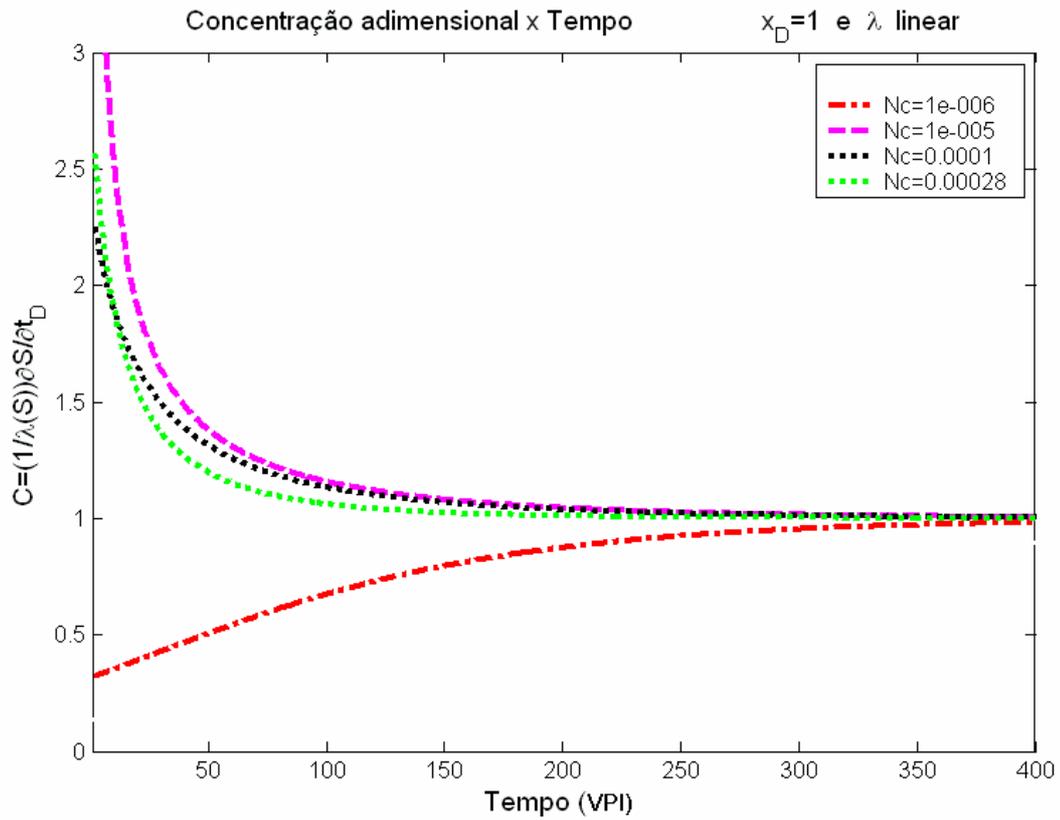


Figura 4-9 – Concentração adimensional no efluente *versus* tempo em 4 velocidades diferentes para λ linear.

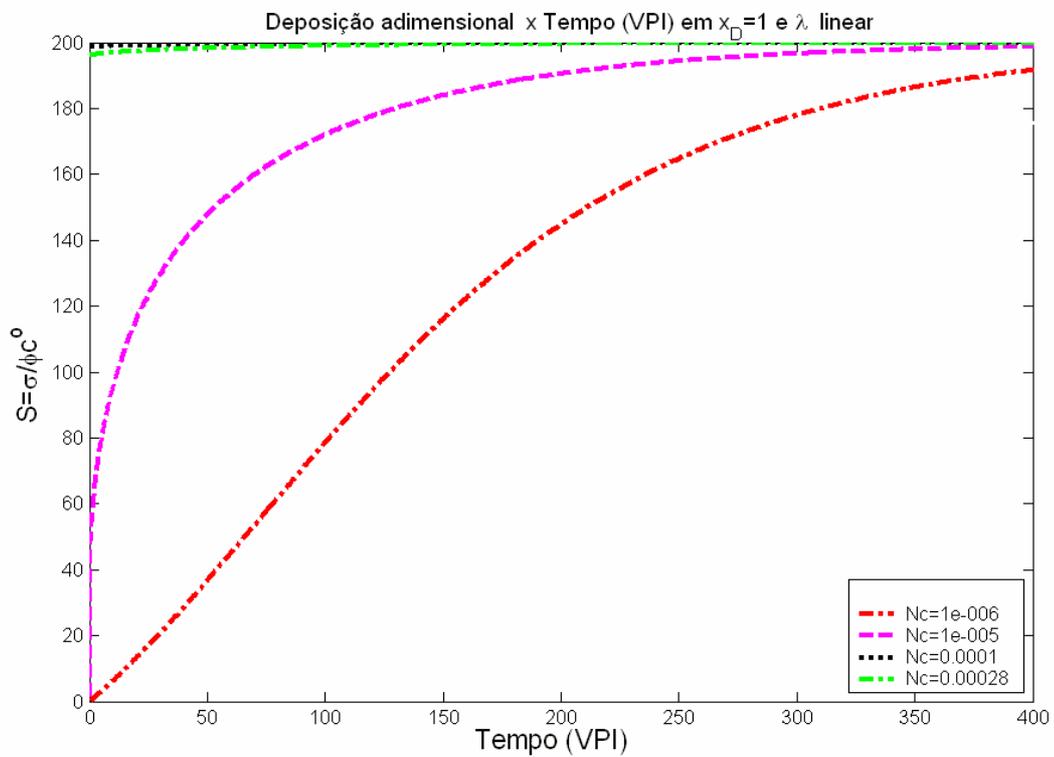


Figura 4-10 - Deposição adimensional *versus* tempo para λ linear.

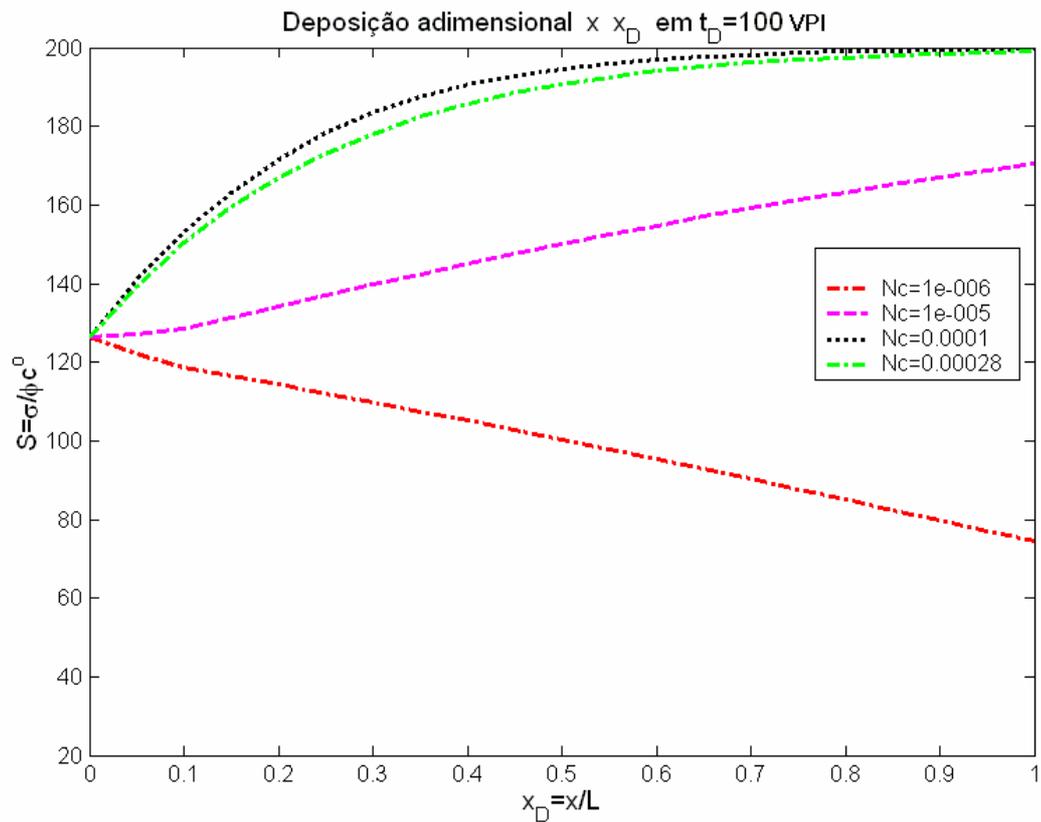


Figura 4-11 - Deposição *versus* distância (adimensionais) no tempo=100VPI para λ linear.

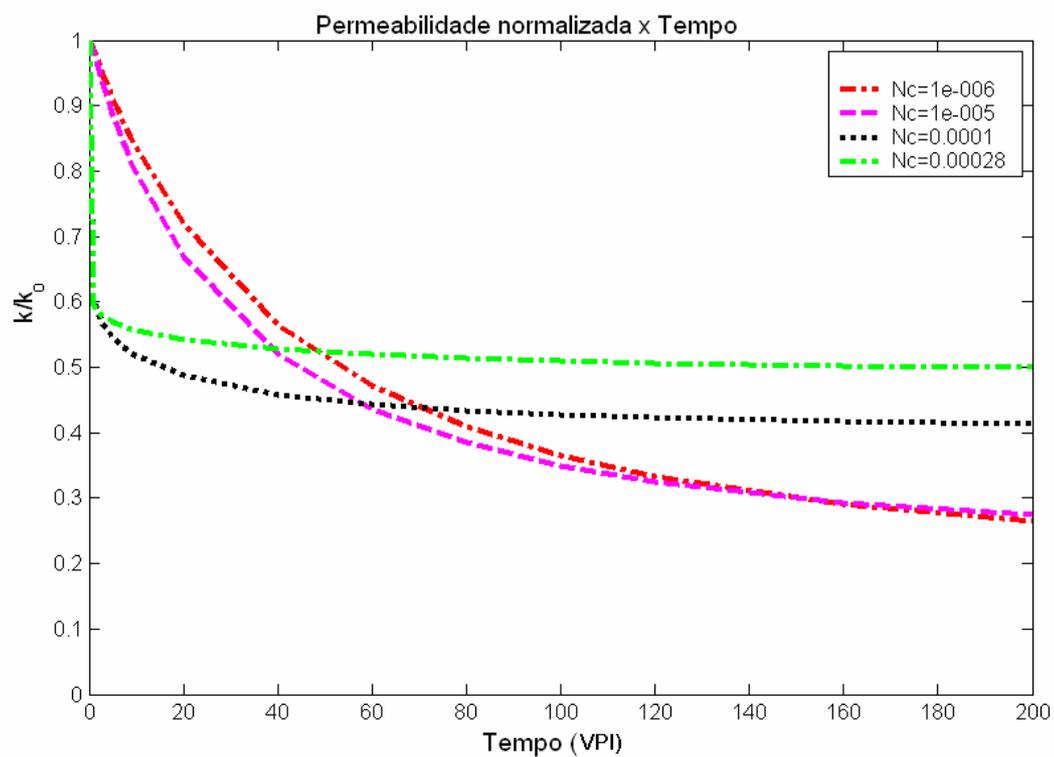


Figura 4-12 – Permeabilidade normalizada *versus* tempo para λ linear.

A principal diferença entre os casos de coeficiente de filtração constante e linear é o processo de estabilização das curvas quando o tempo tende a infinito. No caso linear, o processo de captura e liberação de gotas do óleo residual por *snap-off* cessa quando a captura alcança o valor máximo S_m . A concentração do efluente tende à unidade ($C=1$), a deposição tende ao valor máximo ($S=S_m$) e a permeabilidade tende ao valor mínimo : $k \rightarrow \frac{k_{rw}(s(S_m))}{1 + \beta c^0 \phi S_m}$.

A Tabela 4.2 mostra o número capilar alcançado, além do óleo residual final, após 400 volumes porosos injetados para cada uma das vazões iniciais. A permeabilidade final nas injeções, em vazões mais altas, é menor, porque, a quantidade de óleo inicial é menor e o deslocamento de óleo é muito grande e rápido, portando, o S_m é logo alcançado e a maioria das partículas sai no efluente logo no início da injeção.

Tabela 4.2 – Resultados de deslocamento de óleo calculados para λ linear após 400 VPI

Nc	Sor _{inicial}	Nc(1+ $\beta\Phi C_0 S_{final}$) em T=400	Aumento de Nc	Sor _{final}	ΔS_{or}	% óleo deslocado
10^{-6}	0,4492	$4,45 \cdot 10^{-6}$	4,45	0,4465	0,0027	0,60
10^{-5}	0,4422	$4,6 \cdot 10^{-5}$	4,6	0,4163	0,0259	5,86
10^{-4}	0,3833	$4,6 \cdot 10^{-4}$	4,6	0,2583	0,125	32,61
$2,8 \cdot 10^{-4}$	0,3064	$1,3 \cdot 10^{-3}$	4,6	0,1611	0,1453	62,11

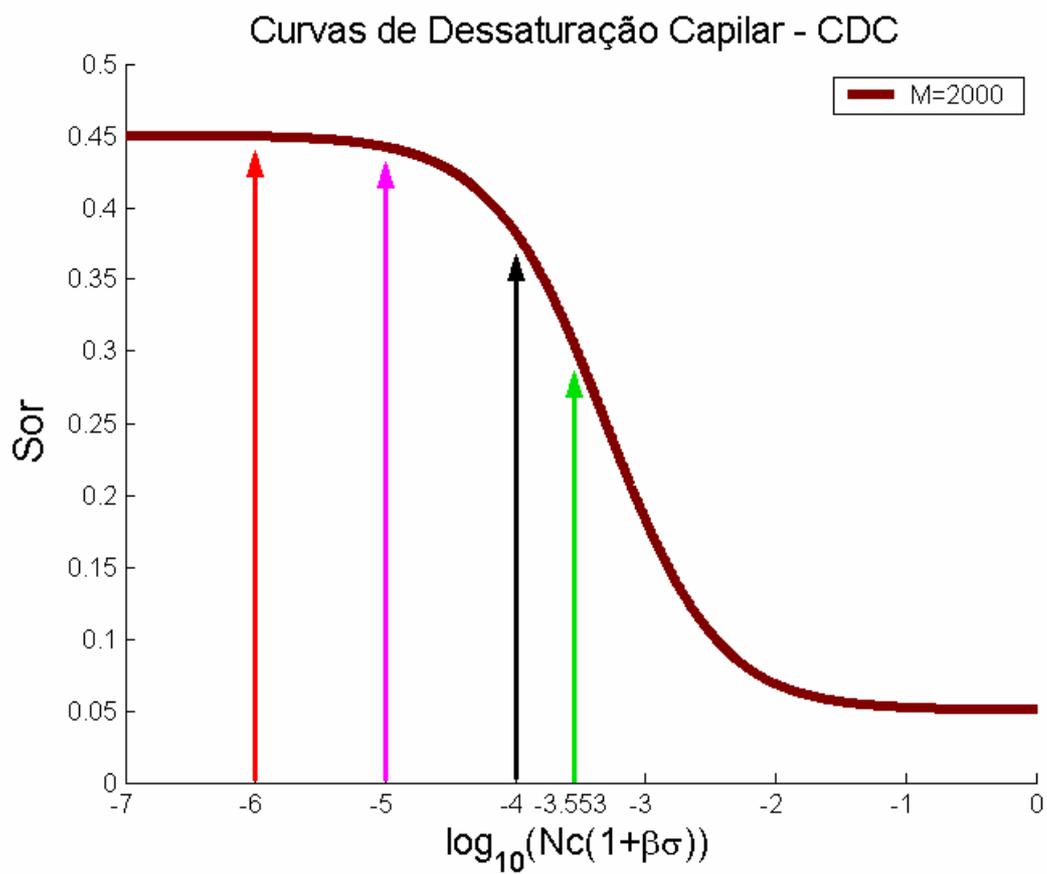


Figura 4-13 – CDC utilizada para a análise do caso onde λ é linear.

4.4 Análise de Sensibilidade do Modelo aos Parâmetros.

Além da análise do comportamento das curvas de concentração do efluente, permeabilidade e deposição das partículas para diversas vazões, apresentamos a seguir o comportamento dessas mesmas curvas com a variação dos parâmetros coeficiente dano à formação (β), coeficiente de filtração (λ), deposição máxima (S_m), concentração da emulsão injetada, além dos parâmetros da CDC: número capilar crítico e quantidade de óleo residual em baixas velocidades.

Como os testes com fluxo de emulsão, apresentados na literatura (SCHMIDT *et.al.*, 1984, SOO e RADKE, 1984, 1986a e 1986b, MENDEZ, 1999), sugerem que o principal efeito na captura de partículas oleosas é a exclusão por tamanho, faremos a análise apenas para o modelo com taxa de captura linear (4.3.1). Usamos, como dados hipotéticos para a construção das curvas, os mesmos parâmetros para a análise do comportamento das curvas em função da vazão utilizados no item 4.3, apenas fixando a vazão em 2.4ml/min ($N_c=1e-5$).

4.4.1 Sensibilidade ao Coeficiente Dano à Formação (β)

A redução da permeabilidade é maior com o aumento de β (Fig. 4-14). A permeabilidade mínima, devido à deposição máxima S_m , é fortemente influenciada por β . Quanto maior β , menor a permeabilidade mínima.

A concentração no efluente aumenta com o aumento de β , podendo alcançar grandes valores quando a liberação de partículas do óleo residual é grande, tendendo sempre para a concentração da emulsão injetada quando a deposição se aproxima da deposição máxima (Fig. 4-15). O aumento de β faz com que a concentração do efluente fique estável mais rápido.

A deposição de partículas aumenta com o aumento de β e a deposição máxima é alcançada mais rapidamente (Fig. 4-16 e Fig. 4-17).

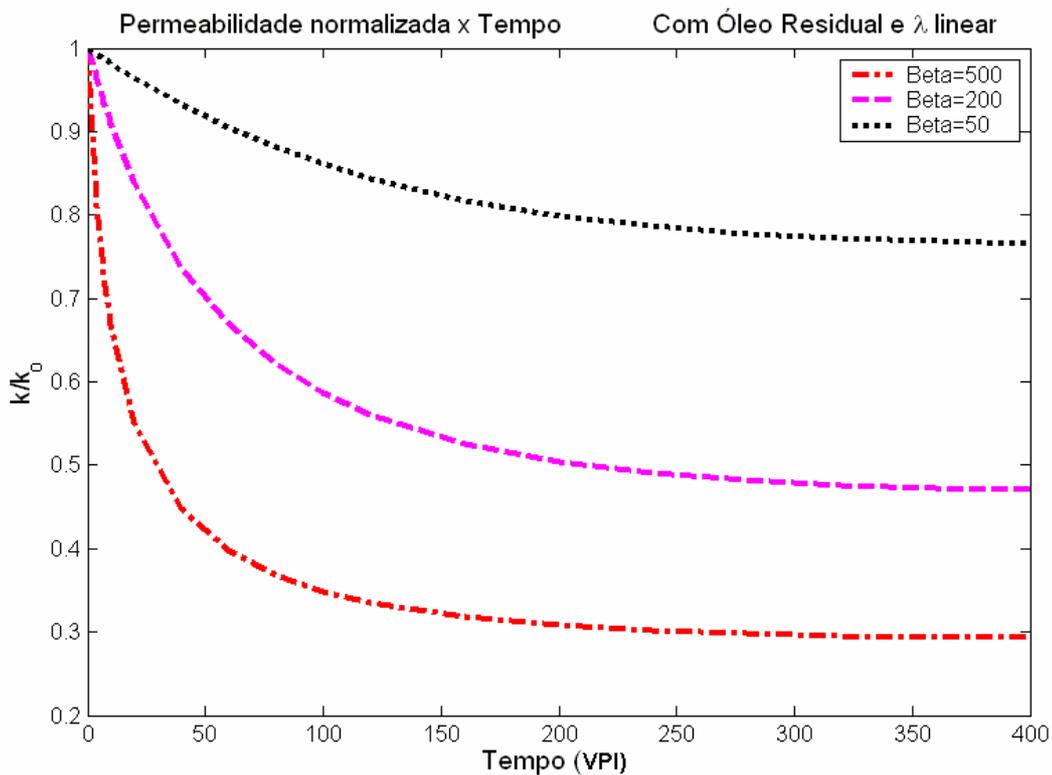


Figura 4-14 – Sensibilidade da permeabilidade normalizada ao parâmetro dano à formação.

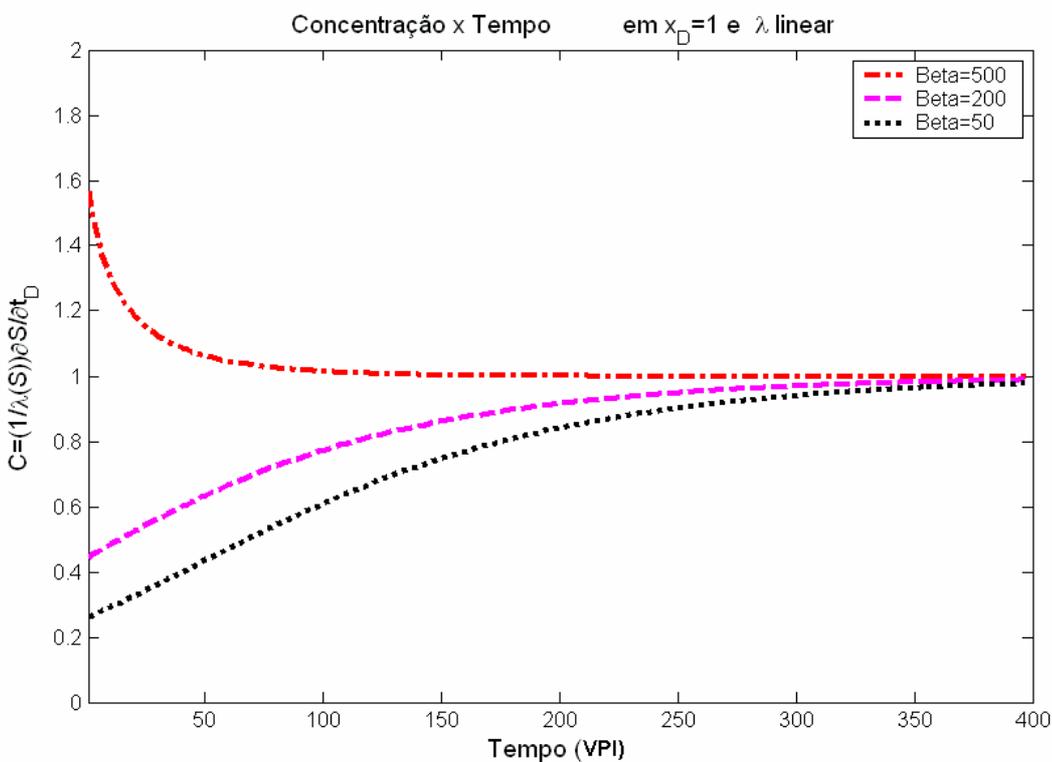


Figura 4-15 – Sensibilidade da curva de concentração adimensional do efluente ao parâmetro dano à formação.

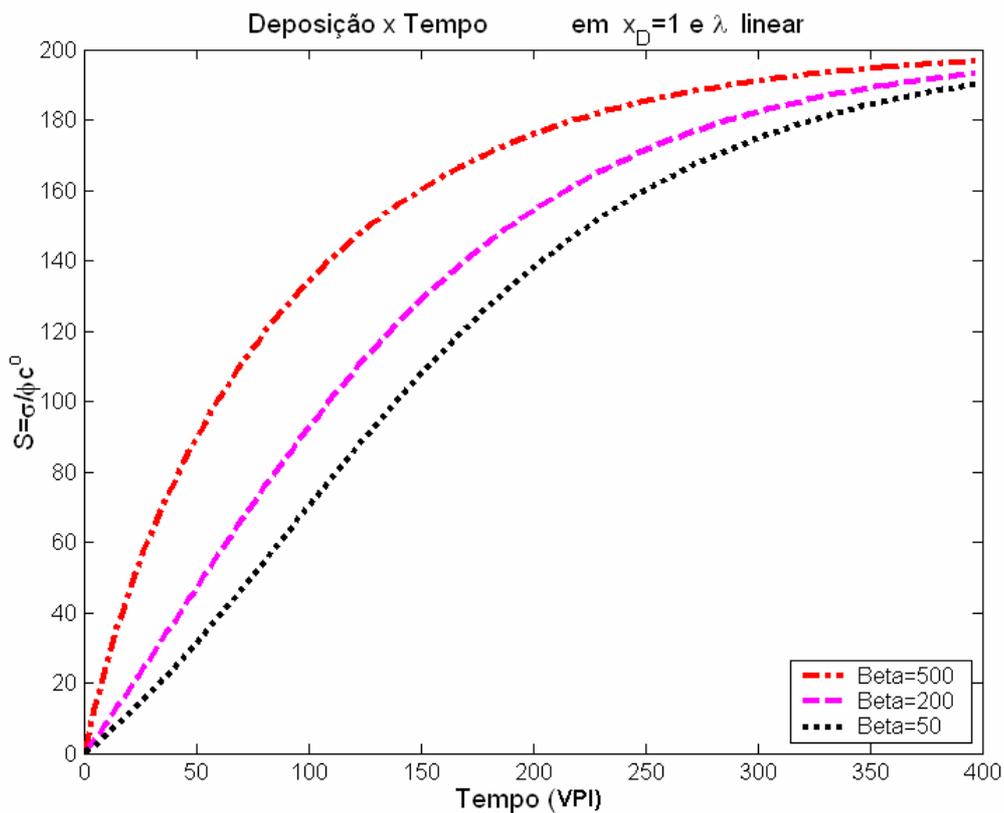


Figura 4-16 – Sensibilidade ao parâmetro dano à formação da curva de deposição adimensional na saída do testemunho *versus* tempo.

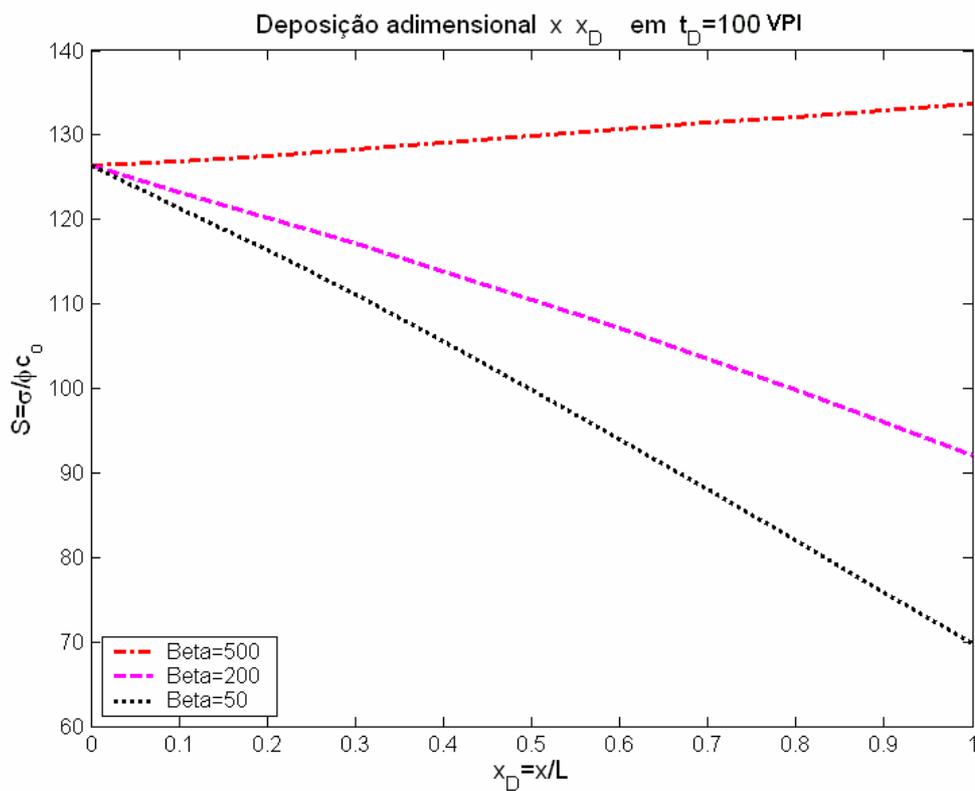


Figura 4-17 – Sensibilidade da curva de deposição *versus* distância (adimensionais) ao parâmetro dano à formação.

4.4.2 Sensibilidade ao Coeficiente de Filtração (λ)

A permeabilidade reduz mais rapidamente com o aumento do valor inicial do coeficiente de filtração λ_0 (Fig. 4-18), alcançando a permeabilidade mínima (devido a S_m) mais rapidamente. O coeficiente λ_0 não altera a permeabilidade mínima.

A concentração no efluente aumenta com o aumento de λ_0 , podendo alcançar grandes valores quando a liberação de partículas do óleo residual é grande, tendendo sempre para a concentração da emulsão injetada quando a deposição se aproxima da deposição máxima (Fig. 4-19). O aumento de λ_0 faz com que a concentração do efluente fique estável mais rápido.

A deposição de partículas aumenta com o aumento de λ_0 e deposição máxima é alcançada mais rapidamente (Fig. 4-20 e Fig. 4-21).

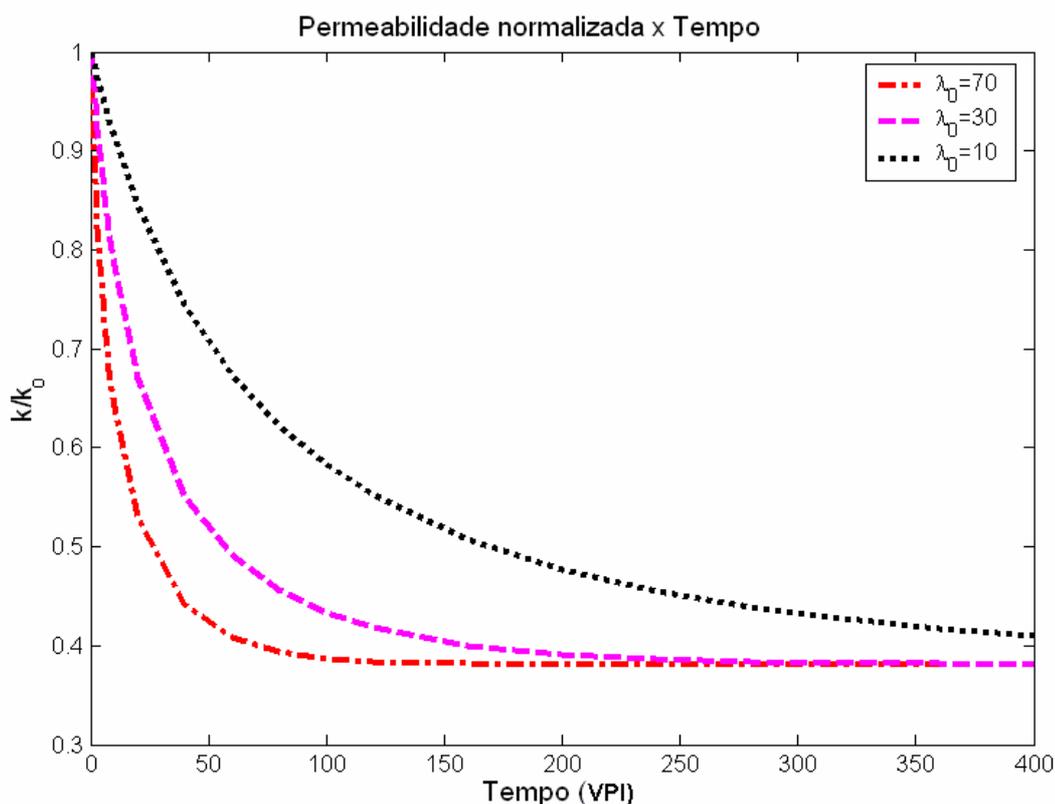


Figura 4-18 – Sensibilidade da permeabilidade normalizada ao coeficiente de filtração.

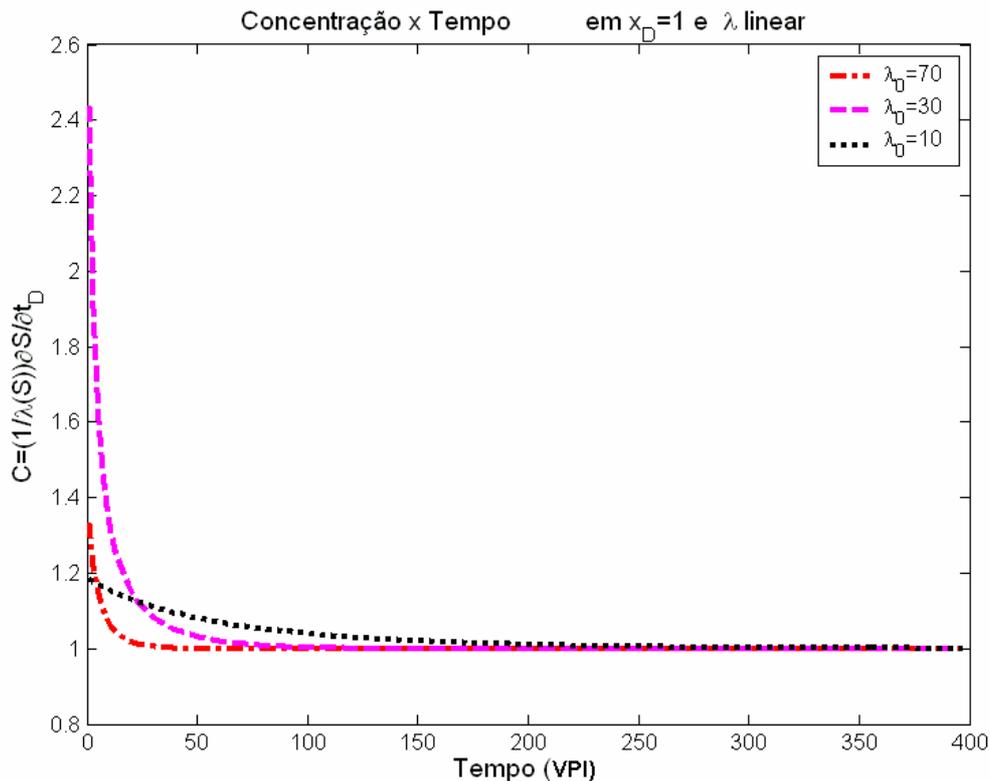


Figura 4-19 – Sensibilidade da concentração adimensional do efluente ao coeficiente de filtração.

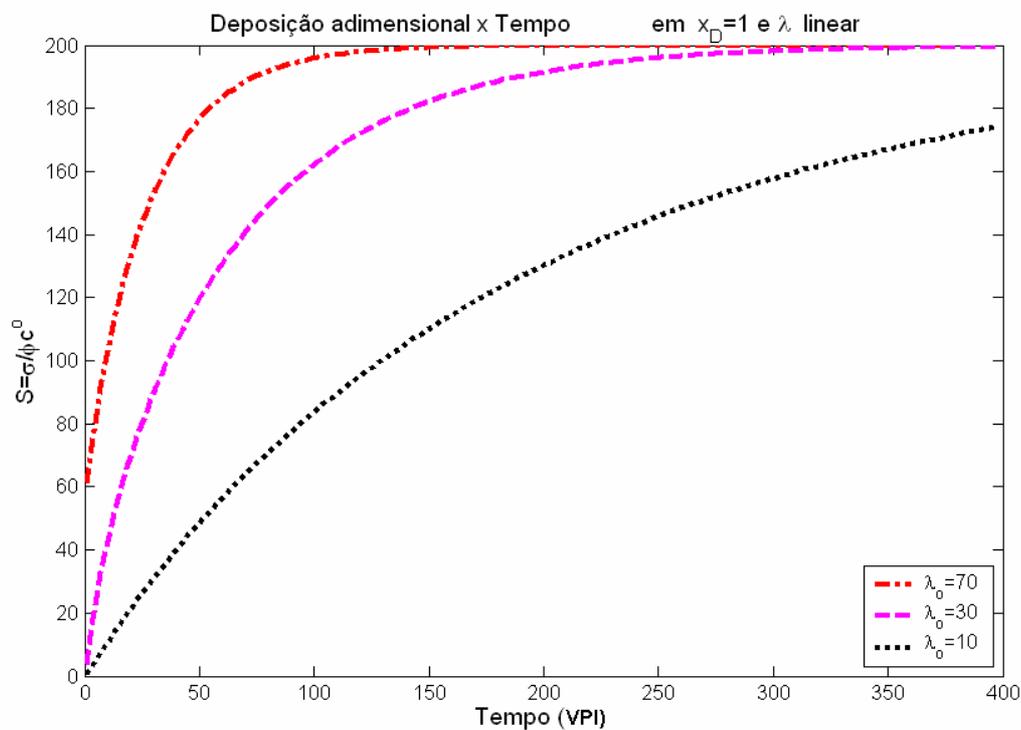


Figura 4-20 – Sensibilidade ao coeficiente de filtração da curva de deposição adimensional na saída do testemunho *versus* tempo.

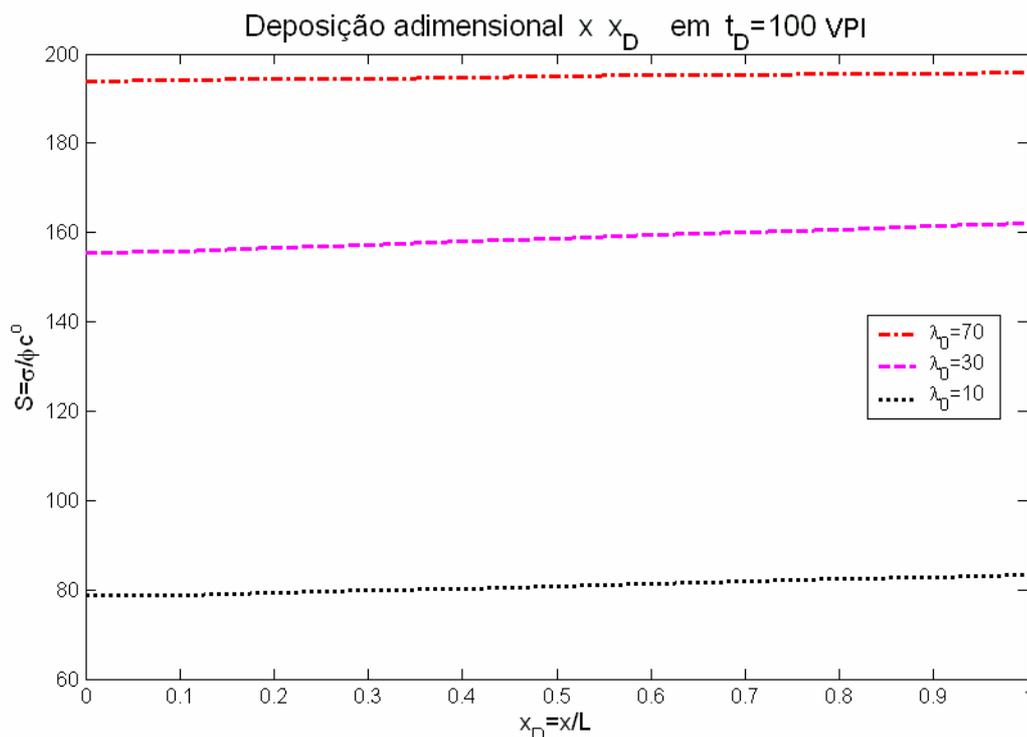


Figura 4-21 – Sensibilidade da curva de deposição *versus* distância (adimensionais) ao coeficiente de filtração.

4.4.3 Sensibilidade ao Parâmetro Deposição Máxima (S_m)

A redução da permeabilidade é maior com o aumento de S_m (Fig. 4-22). Quando a deposição alcança o S_m a permeabilidade estabiliza (permeabilidade mínima).

A concentração no efluente é pouco influenciada pela variação de S_m . Ela demora mais para alcançar a estabilidade quando o S_m é maior. Quando a deposição máxima é alcançada, a concentração do efluente estabiliza e fica igual à da emulsão injetada (Fig. 4-23).

Tanto a deposição quanto a liberação de gotas pelo óleo residual param quando a deposição máxima é alcançada (Fig. 4-23 a Fig 4-25). O tempo para o sistema estabilizar (paralisação da liberação de gotas e da deposição de partículas no meio poroso) é menor quando o S_m é menor (Fig. 4-23 e Fig. 4-24).

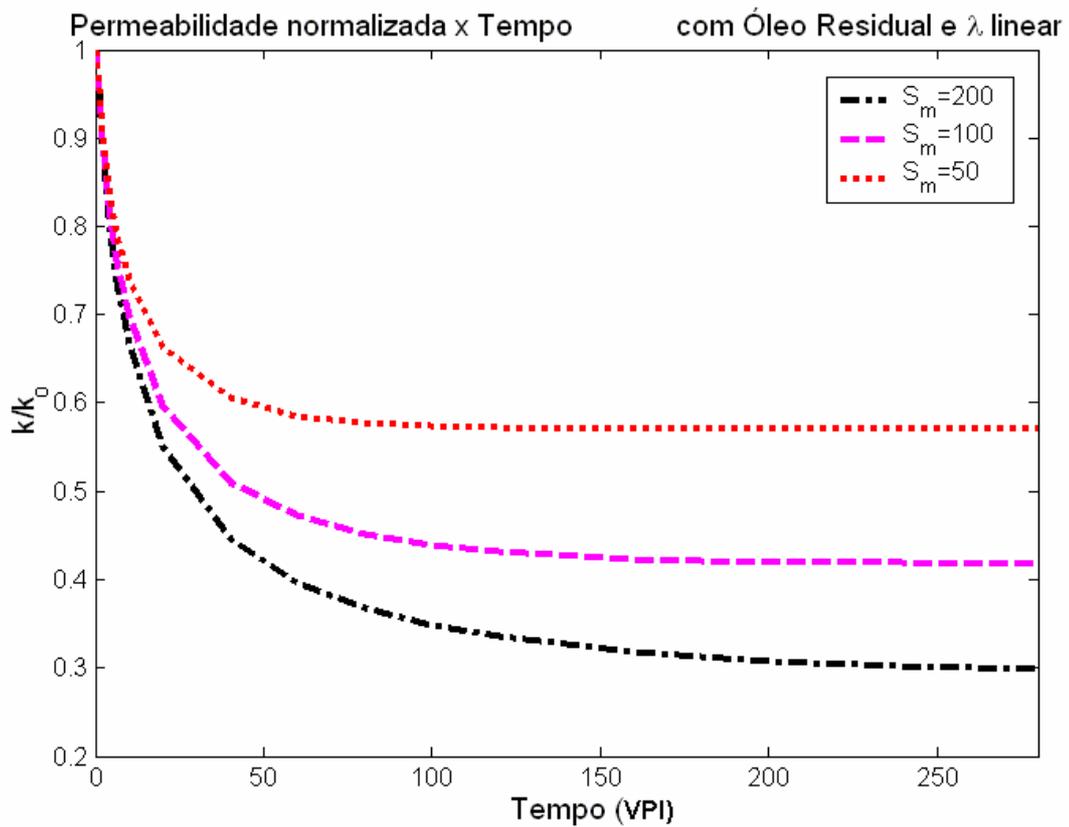


Figura 4-22 – Sensibilidade da permeabilidade normalizada *versus* tempo ao S_m .

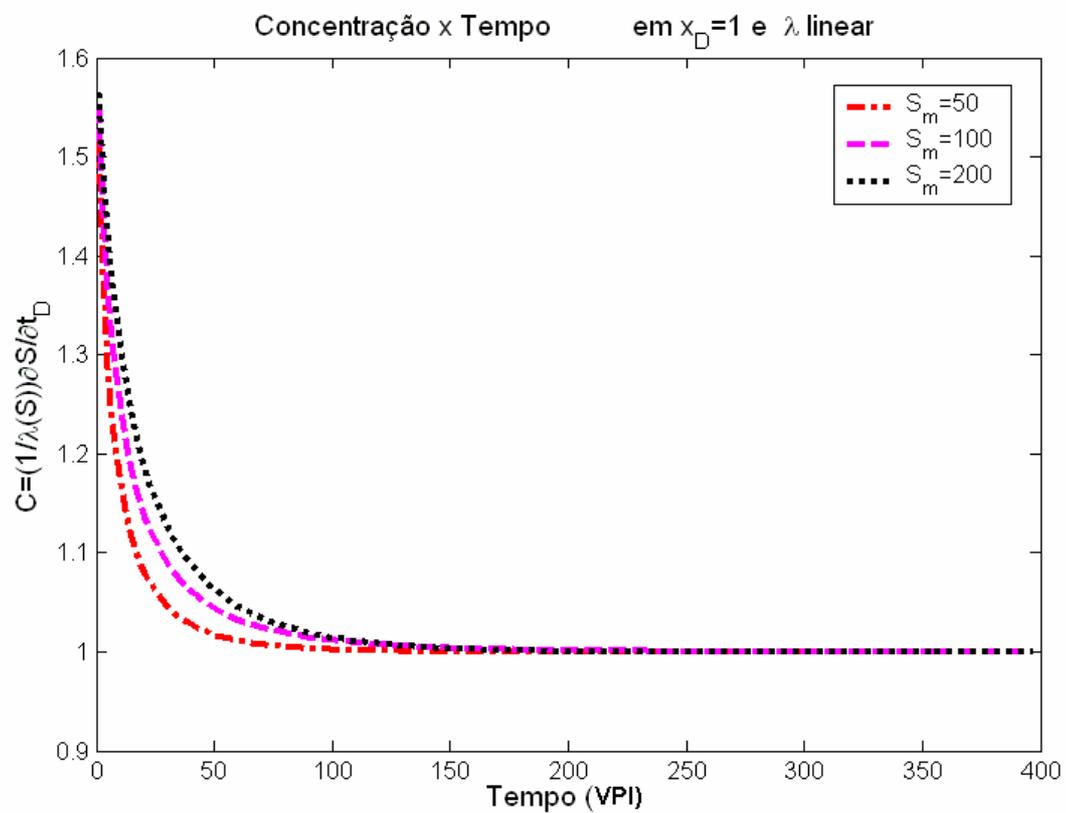


Figura 4-23 – Sensibilidade da concentração adimensional no efluente ao S_m .

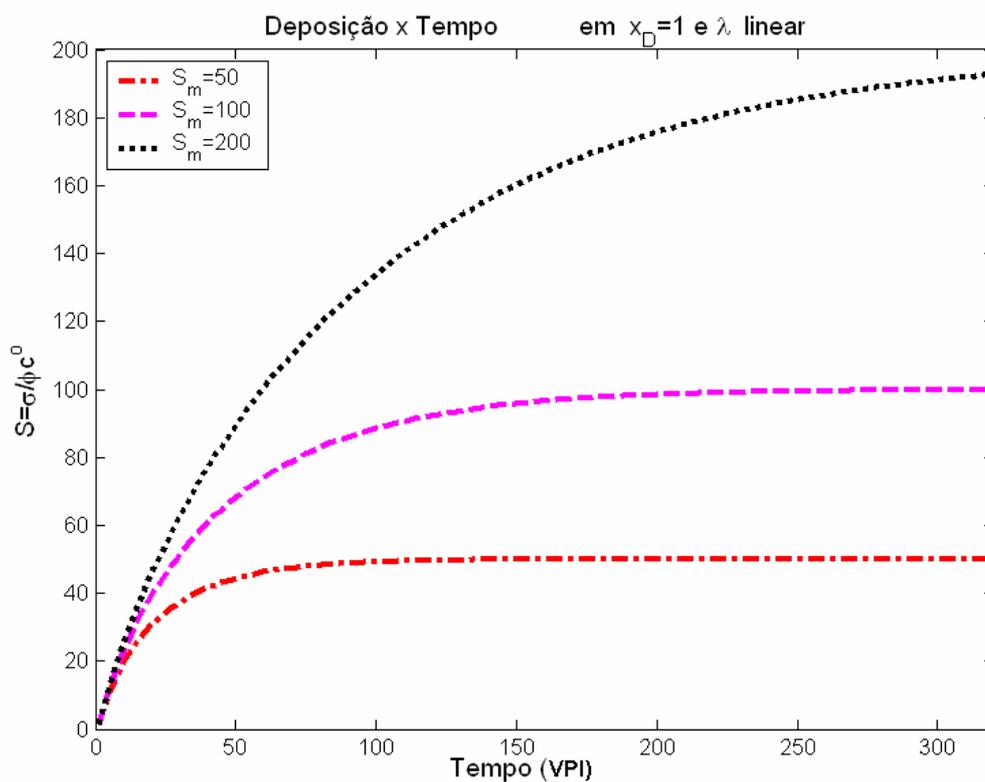


Figura 4-24 – Sensibilidade ao S_m da curva de deposição adimensional na saída do testemunho *versus* tempo.

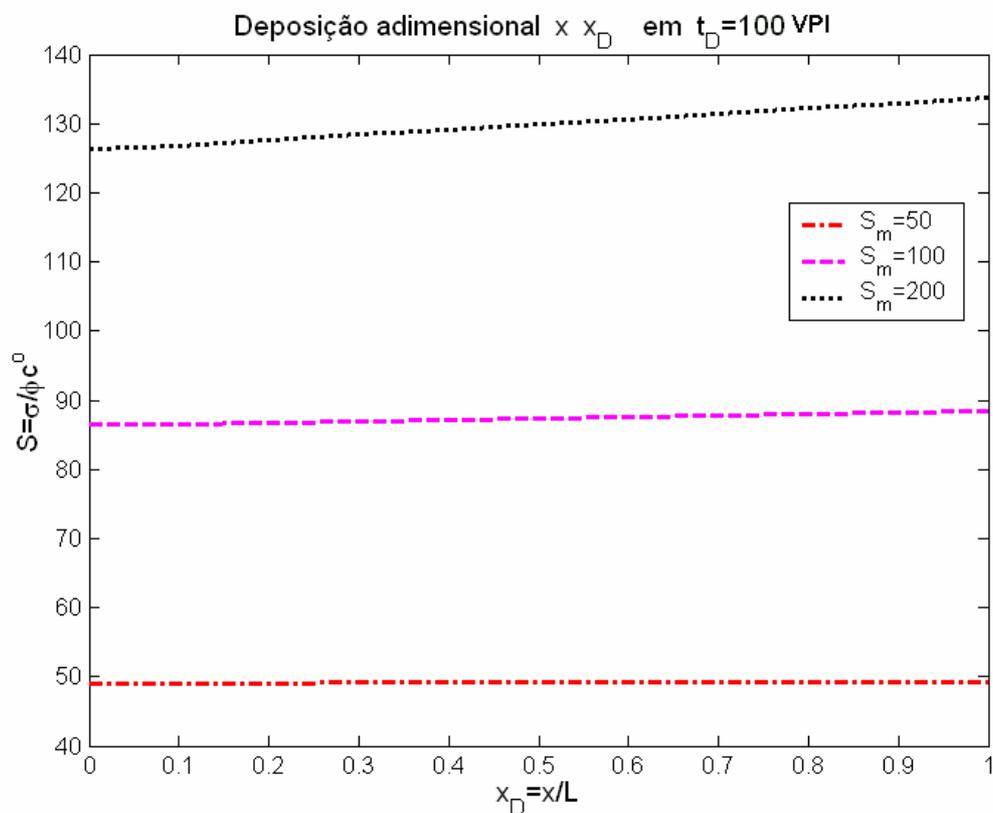


Figura 4-25 – Sensibilidade ao S_m da curva de deposição *versus* distância (adimensionais).

4.4.4 Sensibilidade ao Número Capilar Crítico

A mobilização do óleo residual começa a ficar intensa a partir do número capilar crítico. Portanto, quando o número capilar alcança o valor crítico, a liberação de gotas por *snap-off* fica mais intensa. A Figura 4-26 apresenta as CDC utilizadas neste teste. Quanto menor o número capilar crítico, mais rapidamente a permeabilidade cai (Fig. 4-27) e maior é a concentração no efluente durante os primeiros volumes porosos injetados (Fig. 4-28). Também, é maior a deposição devido à liberação de gotas pelo óleo residual (Fig. 4-29 e Fig. 4-30).

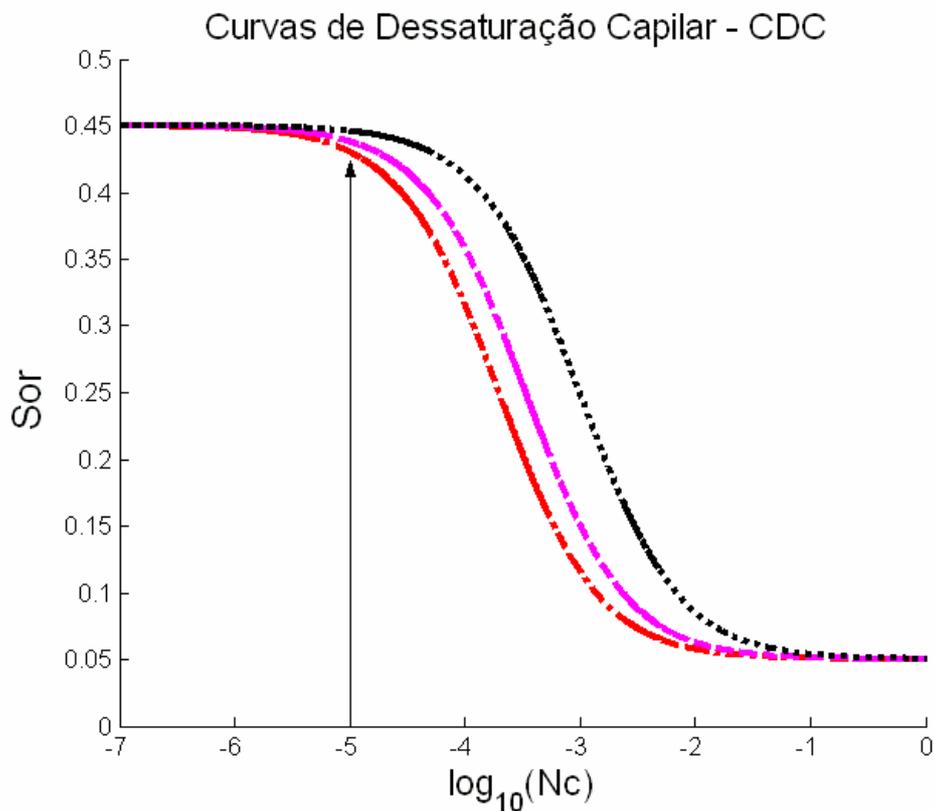


Figura 4-26 – Três CDC utilizadas para o teste de sensibilidade ao número capilar crítico

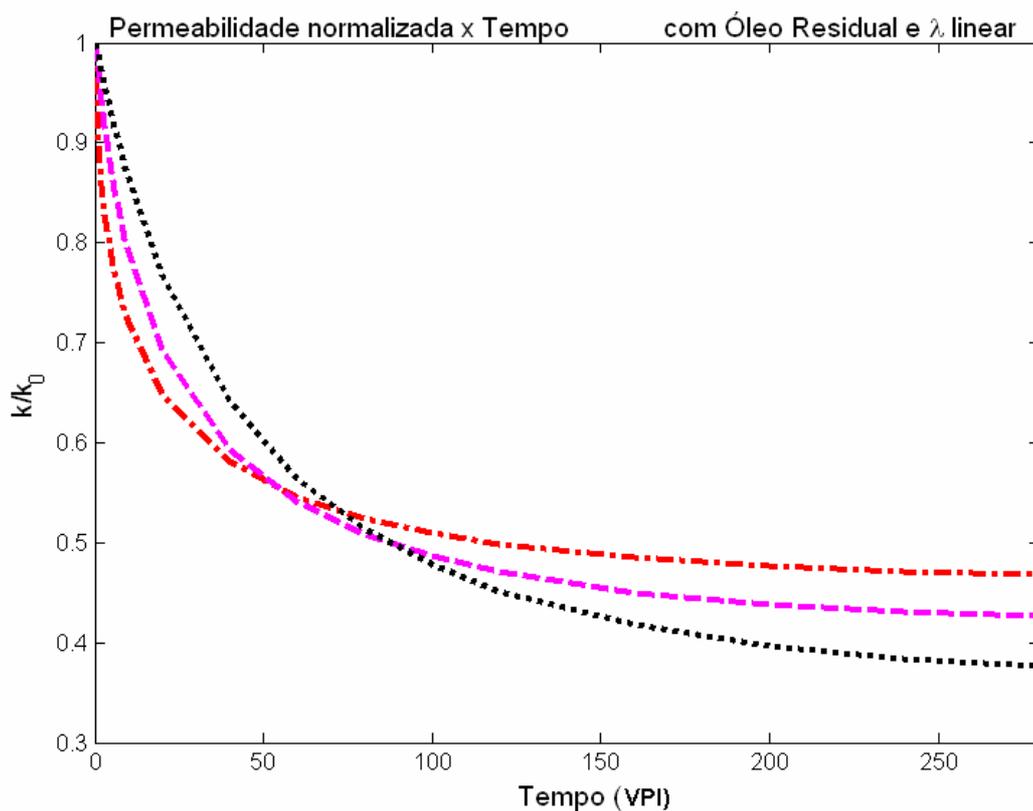


Figura 4-27 – Sensibilidade da permeabilidade normalizada ao número capilar crítico

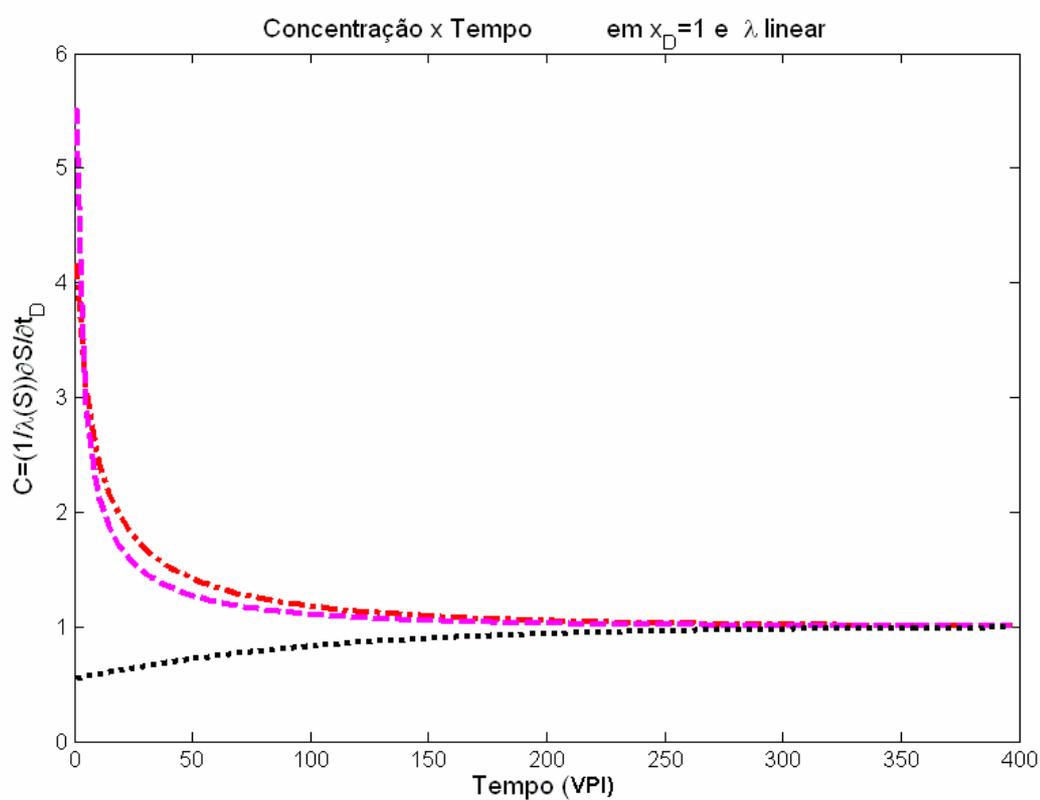


Figura 4-28 – Sensibilidade da concentração adimensional no efluente ao número capilar crítico

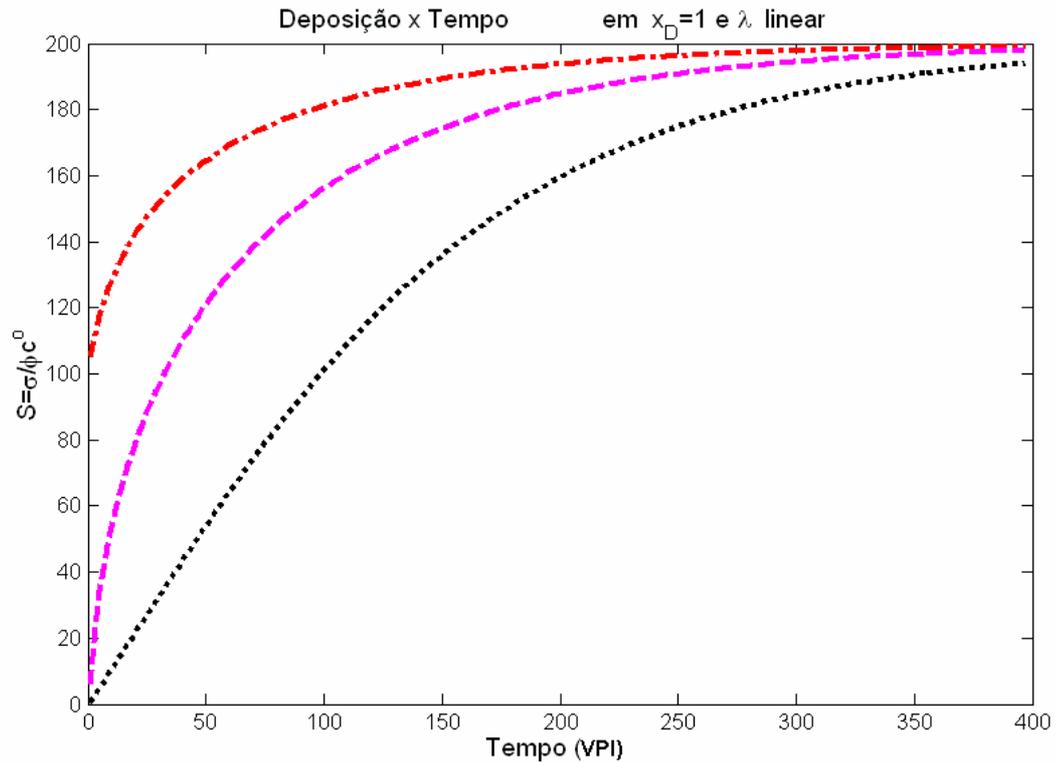


Figura 4-29 – Sensibilidade ao número capilar crítico da curva de deposição adimensional na saída do testemunho *versus* tempo.

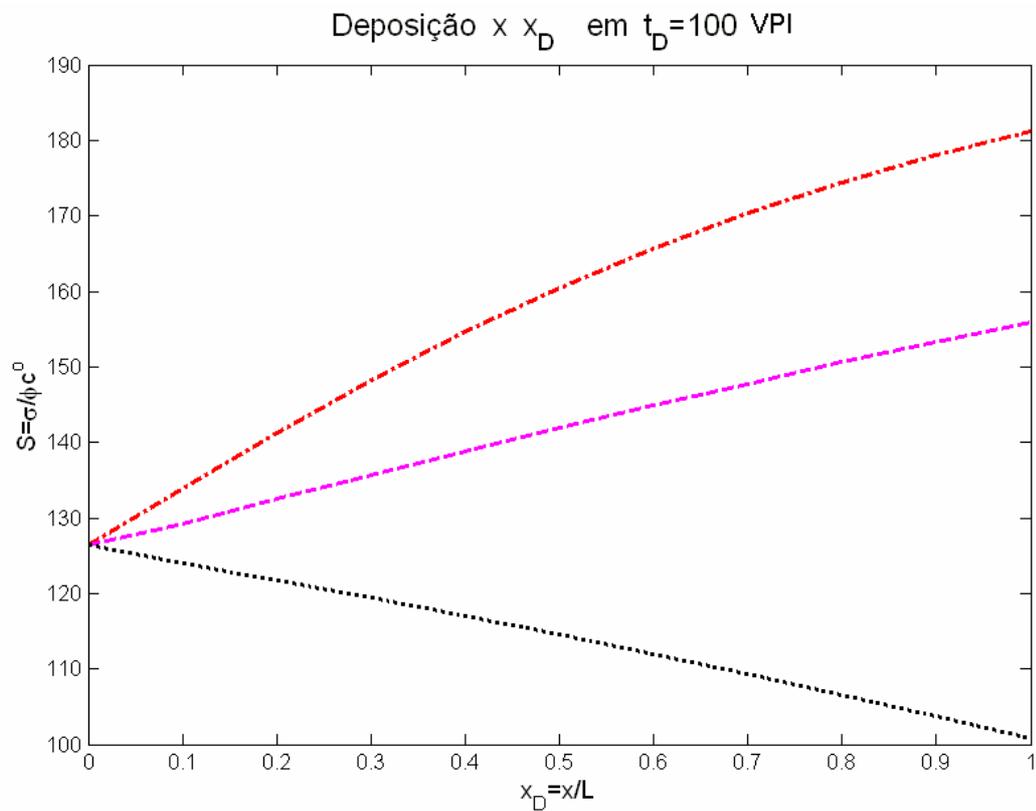


Figura 4-30 – Sensibilidade da deposição *versus* distância (adimensionais) ao número capilar crítico

4.4.5 Sensibilidade ao Óleo Residual do Platô (S_{or1})

A Fig. 4-31 mostra as CDC utilizadas neste teste.

Quanto maior é a quantidade de óleo residual no platô, maior será a quantidade de óleo mobilizado (Fig. 4-33) e, portanto, maior será a quantidade de gotas de óleo liberadas, aumentando a quantidade de gotas capturadas (Fig. 4-34 e Fig. 4-35). A permeabilidade cai mais rápido quando há mais óleo para ser mobilizado (Fig. 4-32).

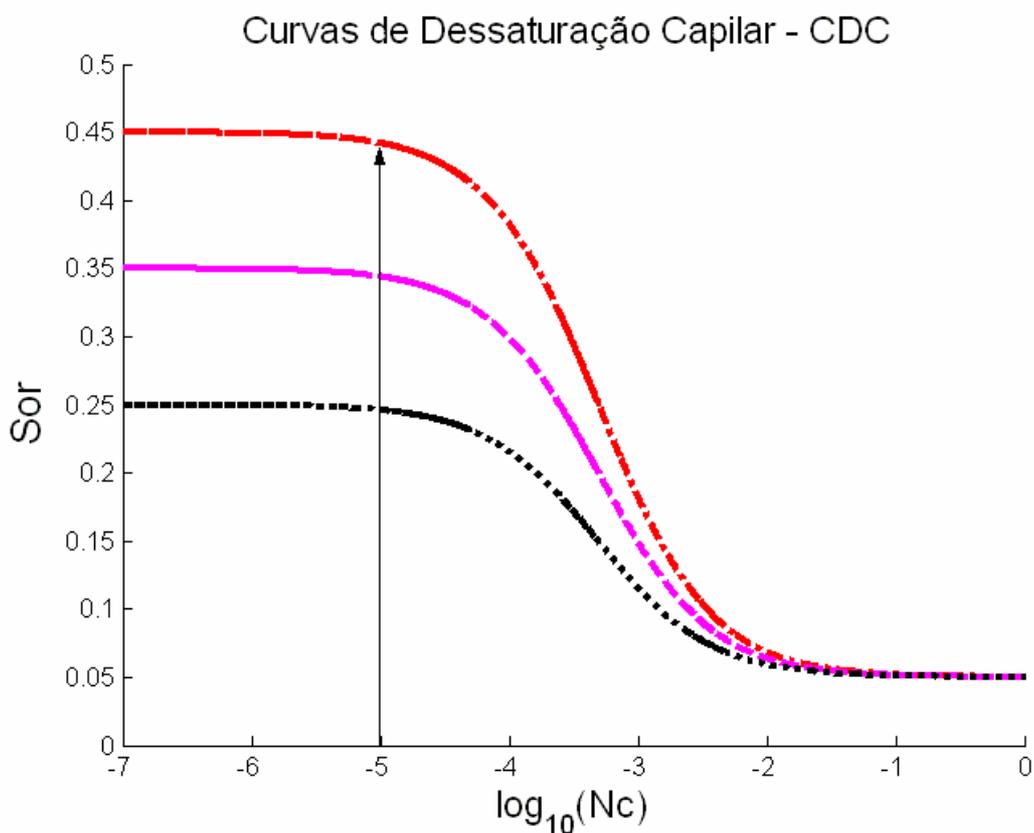


Figura 4-31 – Três CDC utilizadas para o teste de sensibilidade ao óleo residual do platô

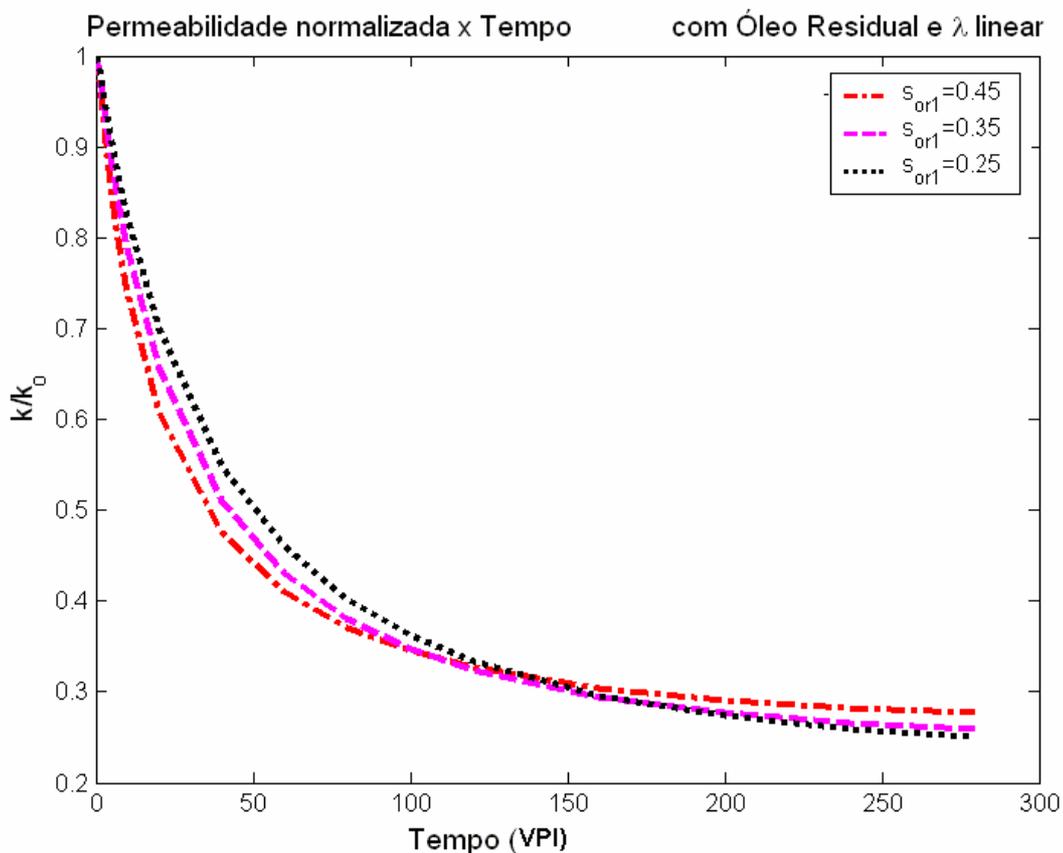


Figura 4-32 – Sensibilidade da permeabilidade normalizada *versus* tempo ao óleo residual do platô.

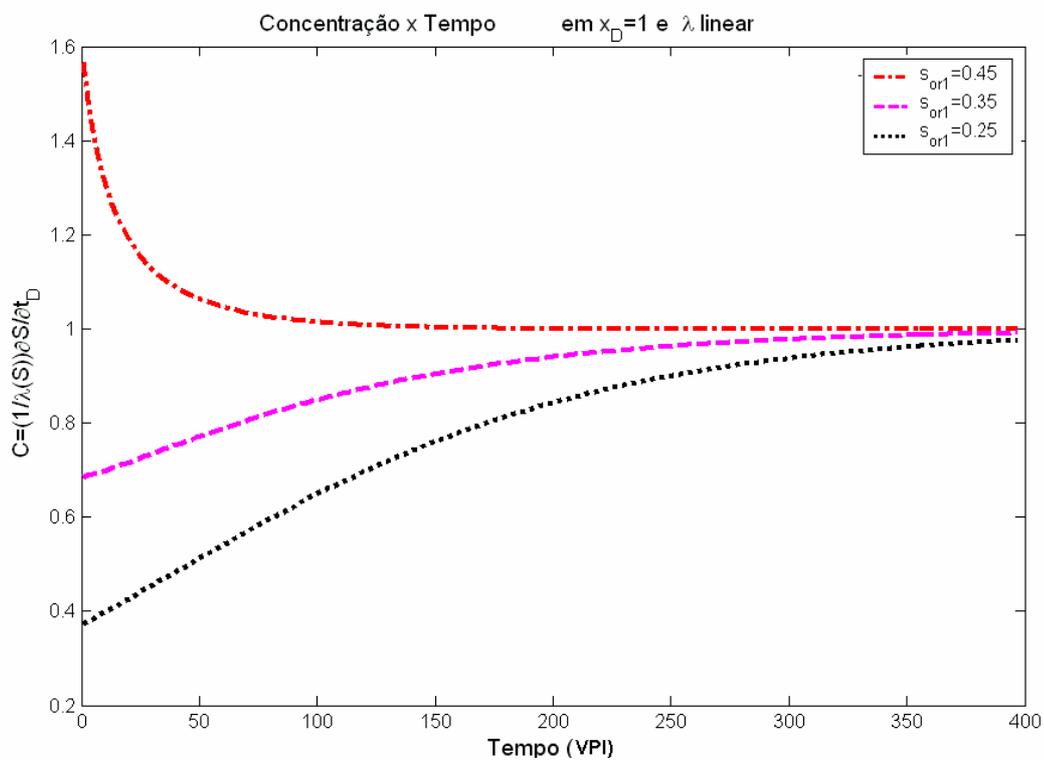


Figura 4-33 – Sensibilidade da concentração adimensional no efluente ao óleo residual do platô.

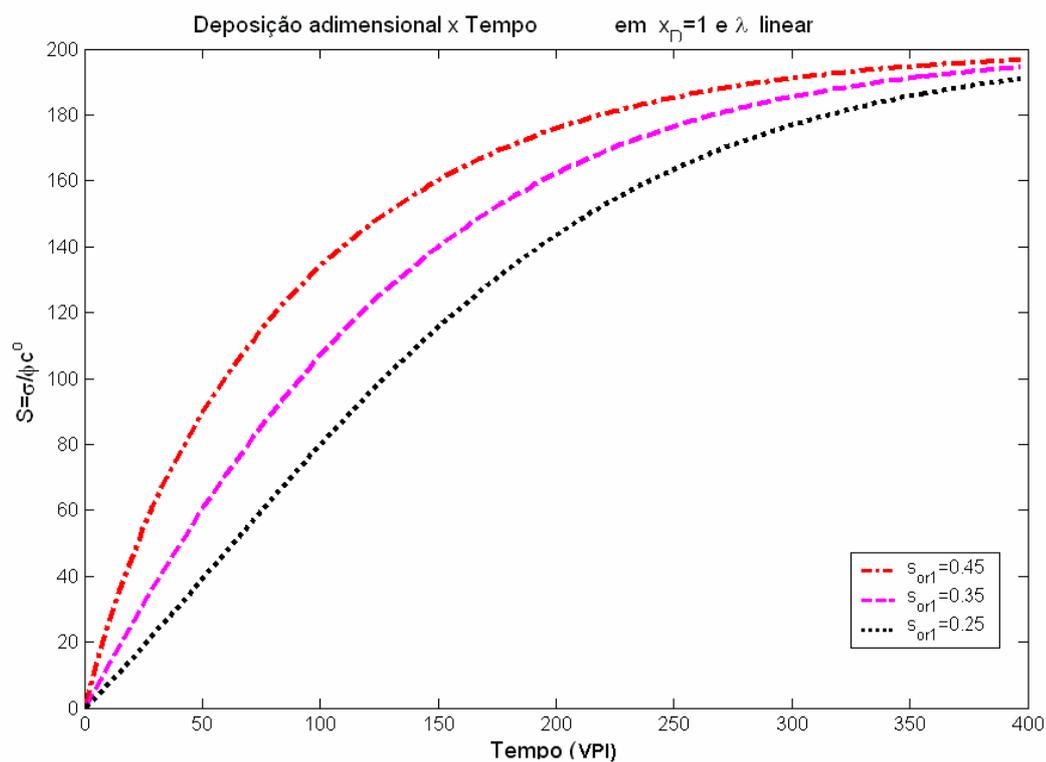


Figura 4-34 – Sensibilidade ao óleo residual do platô da curva de deposição adimensional na saída do testemunho *versus* tempo.

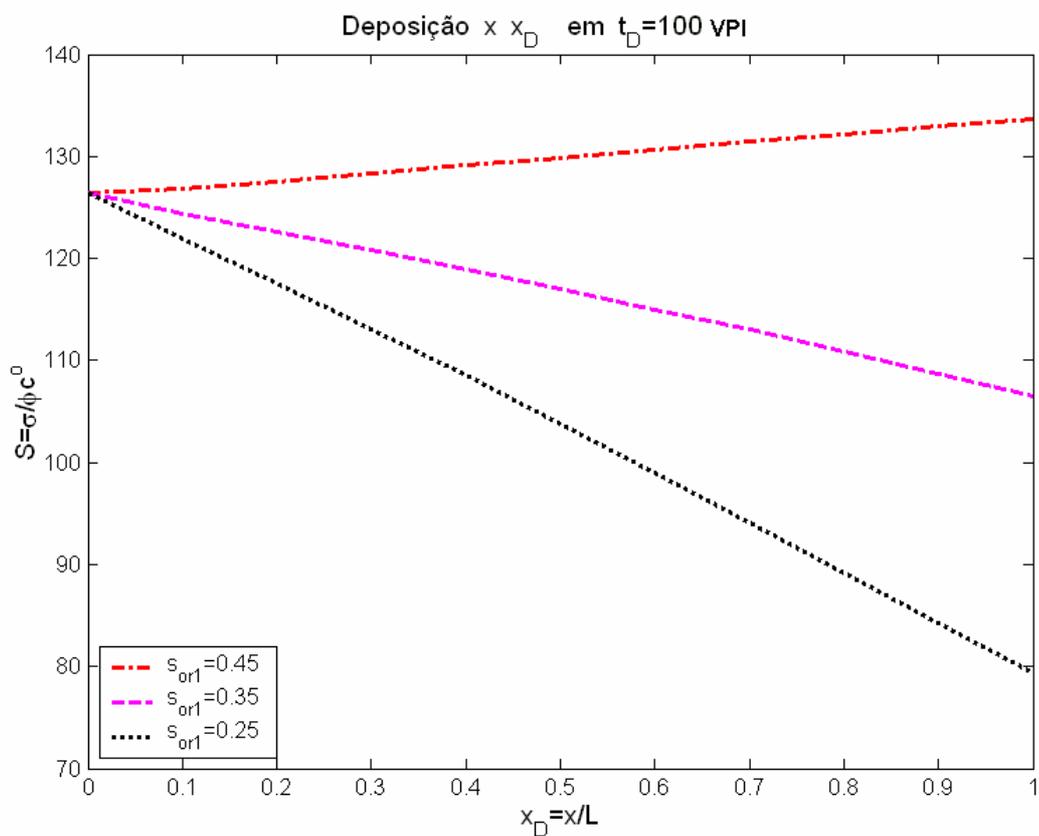


Figura 4-35 – Sensibilidade da deposição *versus* distância (adimensionais) ao óleo residual do platô.

4.4.6 Sensibilidade à Concentração de Partículas Oleosas da Emulsão Injetada (c^0)

A redução da permeabilidade é mais rápida com o aumento de c^0 , no entanto, a permeabilidade mínima não é afetada pela variação de c^0 (Fig.4-36).

O aumento de c^0 provoca uma deposição mais rápida de partículas de óleo fazendo com que a estabilização (deposição máxima) aconteça em um tempo menor (Fig. 4-37 e 4-38). Como deposição adimensional é proporcional a c^0 ($S = \frac{\sigma}{\phi c^0}$), ela aumenta com o aumento de c^0 , mas σ_m não é afetado (Fig. 4-38 e 4-39).

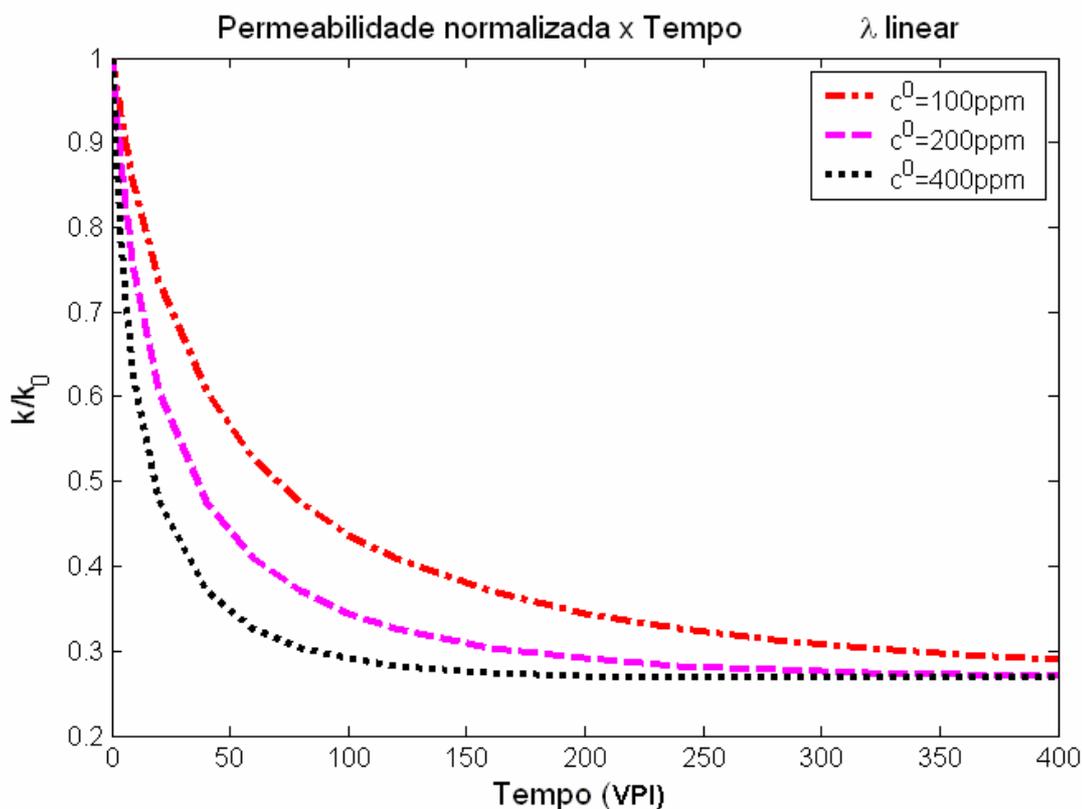


Figura 4-36 - Sensibilidade da permeabilidade normalizada à concentração de partículas oleosas da emulsão.

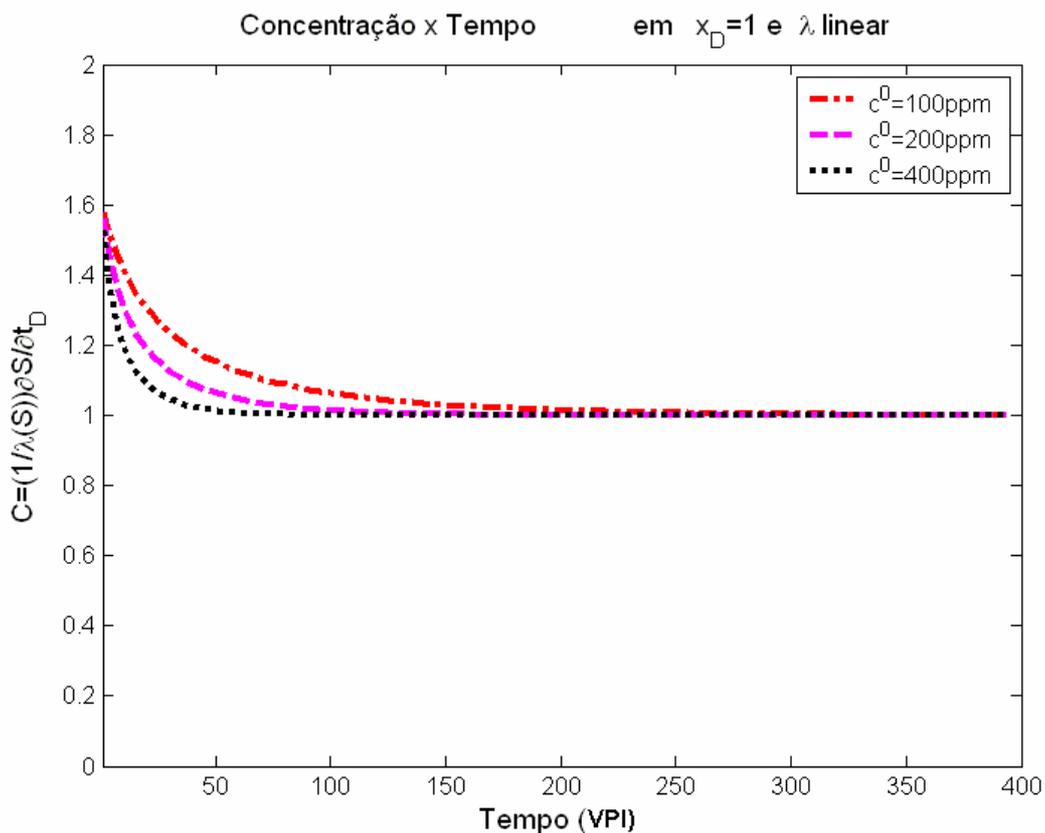


Figura 4-37 - Sensibilidade da concentração adimensional no efluente à concentração de partículas oleosas da emulsão

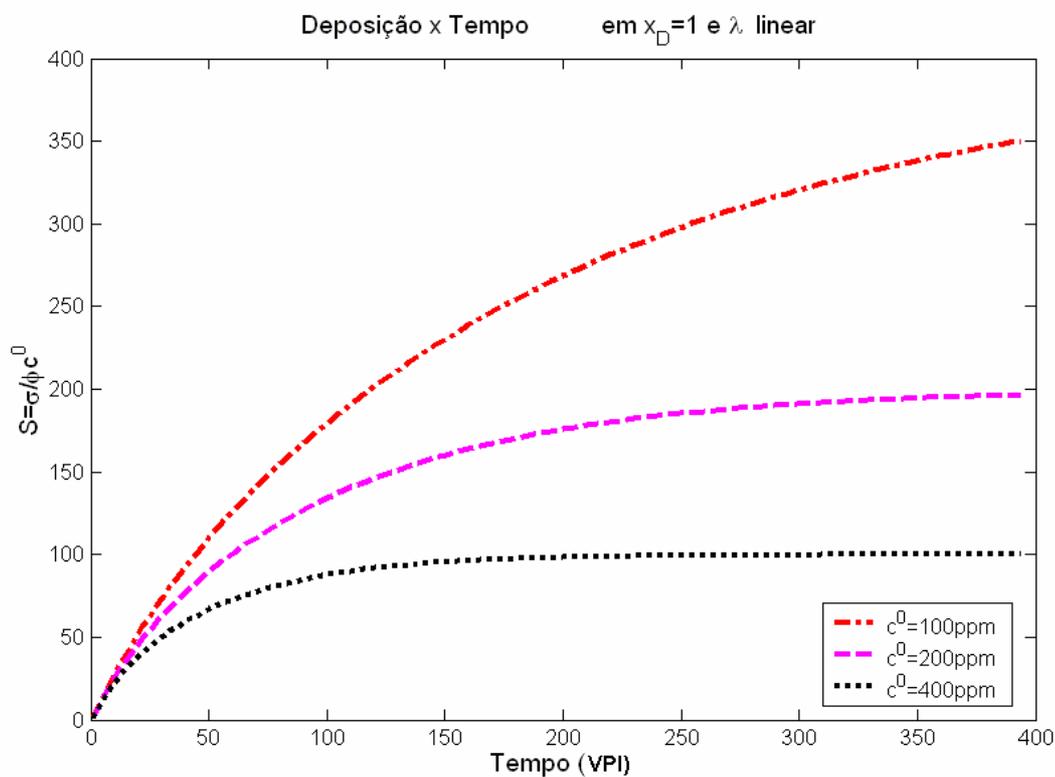


Figura 4-38 - Sensibilidade da curva de deposição no tempo, na saída do testemunho, à concentração de partículas oleosas da emulsão

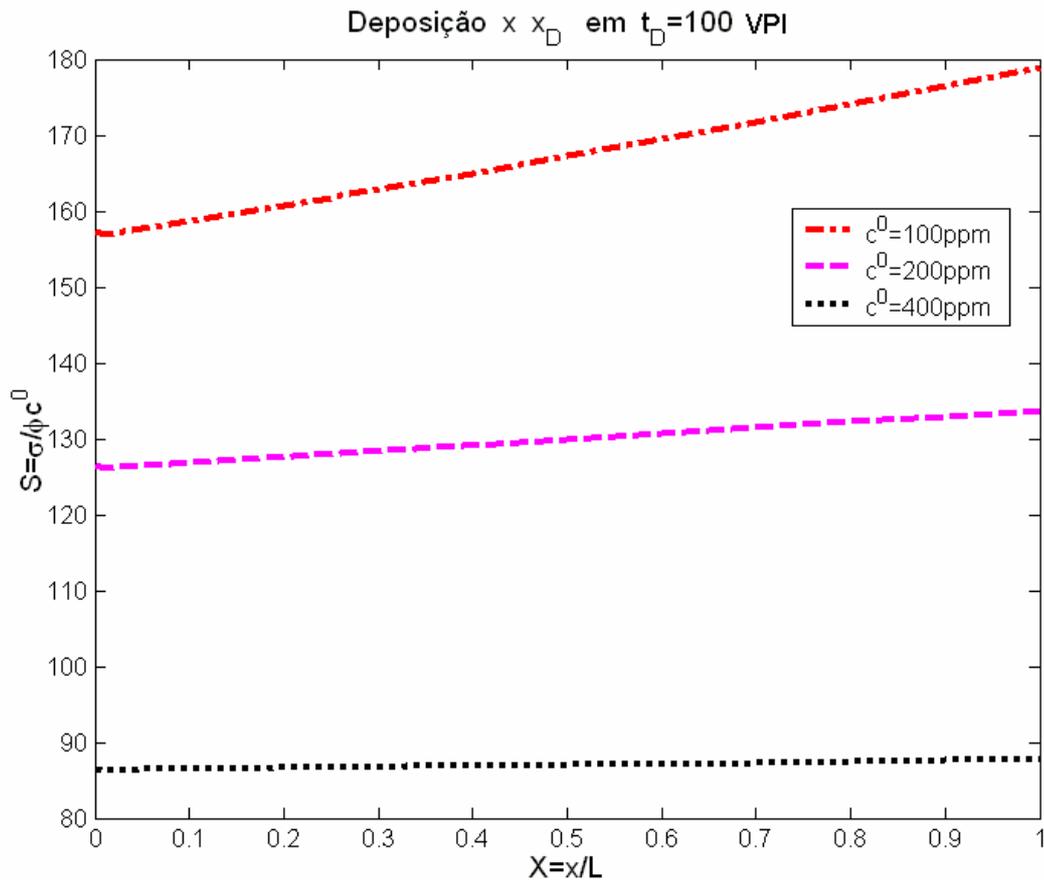


Figura 4-39 - Sensibilidade da deposição versus distância (adimensionais) à concentração de partículas oleosas da emulsão

4.5 Outros Modelos

Os testes com fluxo de emulsão encontrados na literatura (SCHMIDT, *et.al* 1984, SOO e RADKE, 1984 e 1986, MENDEZ, 1999), sugerem que o principal efeito na captura de partículas oleosas é a exclusão por tamanho sendo, portanto, o modelo linear descrito no item 4.3, o mais adequado. No entanto, realizamos soluções para outros tipos de modelos que apresentam solução analítica:

a) $\lambda(S)$ quadrático proposto por IVES (1963):

$$\lambda(S) = \lambda'_0 \left(1 - \left(\frac{S}{S_m} \right)^2 \right) \quad (4.5.1)$$

A solução é apresentada por um sistema de duas equações transcendentais (4.5.2) e (4.5.3) onde A, B e D são dados por (4.6), (4.7) e (4.8) respectivamente:

$$x_D = \frac{1}{\lambda'_0} \left[\left(\frac{D}{A} \left(\ln \left(\frac{S}{S(0, t'_D)} \right) \right) - \frac{S_m + D}{2(A - S_m)} \left(\ln \left(\frac{S - S_m}{S(0, t'_D) - S_m} \right) \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{S_m - D}{2(A + S_m)} \left(\ln \left(\frac{S_m + S}{S_m + S(0, t'_D)} \right) \right) + \frac{S_m^2(D + A)}{A(A^2 - S_m^2)} \left(\ln \left(\frac{A - S}{A - S(0, t'_D)} \right) \right) \right] \quad (4.5.2)$$

$$t_D = x_D - \frac{s_{or0}}{\lambda} \left[\frac{B}{A} \left(\ln \left(\frac{S}{S(0, t'_D)} \right) \right) - \frac{S_m + B}{2(A - S_m)} \left(\ln \left(\frac{S - S_m}{S(0, t'_D) - S_m} \right) \right) + \right. \\ \left. + \frac{S_m - B}{2(A + S_m)} \left(\ln \left(\frac{S_m + S}{S_m + S(0, t'_D)} \right) \right) + \right. \\ \left. + \frac{S_m^2(B + A)}{A(A^2 - S_m^2)} \left(\ln \left(\frac{A - S}{A - S(0, t'_D)} \right) \right) \right] + \left[\frac{S_m^2}{\lambda} \frac{1}{2S_m} \left(\ln \left(\frac{S_m + S(0, t'_D)}{S_m - S(0, t'_D)} \right) - 1 \right) \right] \quad (4.5.3)$$

b) $\lambda(S)$ variando com a velocidade (baseado em PAYATAKES et. al., 1973, JANSSEN, 2000, TUFENKJI e ELIMELECH, 2004):

$$\lambda(S) = \frac{\lambda'_0}{1 + \beta\phi c^0 S} \quad (4.5.4)$$

A solução é apresentada por um sistema de duas equações transcendentais (4.5.5) e (4.5.6) onde A, B e D são dados por (4.6), (4.7) e (4.8) respectivamente:

$$x_D = \frac{1}{\lambda'_0 E} \left[-(S - S(0, t'_D)) + \frac{ED}{A} \ln \left(\frac{S}{S(0, t'_D)} \right) - \left[\frac{ED}{A} + E + D + A \right] \left(\ln \left(\frac{A - S}{A - S(0, t'_D)} \right) \right) \right] \quad (4.5.5)$$

$$t_D = \frac{1}{\lambda'_0 E} \left[(s_{or0} - 1)(S - S(0, t'_D)) + \frac{E(D - s_{or0}B)}{A} \ln \left(\frac{S}{S(0, t'_D)} \right) + (s_{or0} - 1) \left(\frac{EB}{A} + E + B + A \right) \left(\ln \left(\frac{A - S}{A - S(0, t'_D)} \right) \right) \right] + \left(\frac{S(0, t'_D)}{\lambda'_0} + \frac{S(0, t'_D)^2}{2\lambda'_0 E} \right) \quad (4.5.6)$$

$$\text{onde } E = \frac{1}{\beta\phi c^0} \quad (4.5.7)$$

b) $\lambda(S)$ variando com a velocidade e com exclusão por tamanho:

$$\lambda(S) = \frac{\lambda'_0}{(1 + \beta\phi c^0 S)} \left(1 - \frac{S}{S_m} \right) \quad (4.5.8)$$

A solução é apresentada por um sistema de duas equações transcendentais (4.5.9) e (4.5.10) onde A, B, D e E são dados por (4.6), (4.7), (4.8) e (4.5.7) respectivamente:

$$x_D = \frac{S_m}{\lambda'_0 E} \left[\frac{DE}{S_m A} \left(\ln \left(\frac{S}{S(0, t'_D)} \right) \right) + \frac{(S_m + D)(S_m + E)}{S_m (S_m - A)} \left(\ln \left(\frac{S_m - S}{S_m - S(0, t'_D)} \right) \right) - \frac{(A + D)(A + E)}{A(S_m - A)} \left(\ln \left(\frac{A - S}{A - S(0, t'_D)} \right) \right) \right] \quad (4.5.9)$$

$$t_D = \frac{S_m}{\lambda'_0 E} \left[\frac{DE - s_{or0} B E}{S_m A} \left(\ln \left(\frac{S}{S(0, t'_D)} \right) \right) + \frac{(S_m + D)(S_m + E) - s_{or0} (S_m + B)(S_m + E)}{S_m (S_m - A)} \left(\ln \left(\frac{S_m - S}{S_m - S(0, t'_D)} \right) \right) - \frac{(A + B)(A + E) - (A + D)(A + E)}{A(S_m - A)} \left(\ln \left(\frac{A - S}{A - S(0, t'_D)} \right) \right) \right] + \frac{S_m}{\lambda'_0 E} (S(0, t'_D) + (S_m + E) \ln \left(\frac{S_m - S(0, t'_D)}{S_m} \right)) \quad (4.5.10)$$

5. Procedimentos para Validação do Modelo e Correção de Testes de Permeabilidade Relativa

Para a validação do modelo, podemos realizar testes laboratoriais, basicamente, com o seguinte procedimento:

- a) Medir as características básicas do testemunho (porosidade, permeabilidade, dimensões).
- b) Produzir a curva de dessaturação do testemunho.
- c) Produzir e caracterizar a emulsão a ser injetada (concentração, diâmetro médio das gotas, tensão superficial água/óleo, densidade).
- d) Saturar o testemunho com óleo (utilizando o mesmo tipo de óleo para a emulsão e testemunho) e efetuar a injeção de água pura numa vazão Q até a formação do óleo residual.
- e) Efetuar a previsão de tempos de injeção da emulsão e queda de permeabilidade utilizando o modelo.
- f) Injetar a emulsão na mesma vazão Q (item 'd') e medir a pressão no testemunho e a concentração do efluente.
- g) Verificar a concordância com o modelo.

Infelizmente, não encontramos na literatura nenhum procedimento semelhante. Além disso, nosso laboratório ainda não está equipado para a realização deste tipo de teste. A grande maioria de testes de injeção de emulsão encontrados na literatura, tem por objetivo investigar o aumento de produção de óleo ou estudar o comportamento da emulsão em meio poroso (normalmente com $S_w=100\%$) ou para estudar a emulsão produzida pelo óleo residual nos poços de produção após a chegada da água injetada (SCHMIDT, 1982, ALI *et. al.*, 2005, ALI e CURIE, 2005, ALVARADO e MARDSEN JR., 1979, JANSSEN, 2000, KHAMBHARATANA *et. al.*, 1998, SOO e RADKE, 1984, 1986a, 1986b, THOMAS e FAROUQ ALI, 1989, TABER, 1969). O único trabalho que se aproxima aos necessários para a validação do modelo proposto foi o que Mendez efetuou (MENDEZ, 1999). No entanto, ela injetou a emulsão sempre numa velocidade inferior à da formação do óleo residual.

5.1 Descrição dos Testes

Mendez (1999) realizou diversos testes de injeção de emulsão estável óleo/água com baixa concentração (1000, 200 e 50 ppm) em testemunhos contendo óleo residual. O óleo da emulsão foi o mesmo injetado no testemunho para a obtenção do óleo residual em cada teste. Foram utilizados dois tipos de óleo: Brent com viscosidade de 3cp e Prudhoe Bay com viscosidade de 15cp. Ela utilizou também dois tipos de testemunhos: Berea com permeabilidade variando entre 100md e 300md e Aloxite (sintético) com permeabilidade variando de 400md a 1200md. A emulsão tinha partículas oleosas com tamanho médio de 1 μ m a 2 μ m. As vazões utilizadas foram de 1/2, 2, 4 e 6 ml/min correspondendo a N_c variando de $4e-7$ a $1,6e-5$. O óleo residual variou nos testemunhos de 26% a 38% do volume poroso.

Procedimento experimental:

a) Os testemunhos com diâmetro de 2,54cm (1pol) e comprimento de 15,24cm (6pol) ou 10,16cm (4 pol) primeiro passaram por um processo de secagem.

b) Os testemunhos foram colocados em um *core holder* e confinados a uma pressão de 2000psig . Então, eles foram saturados com salmoura, em vácuo (-76 cm Hg), para a determinação do volume poroso (VP).

c) 10 VP de salmoura foram injetados para garantir a completa saturação. A salmoura a 3% NaCl foi utilizada em todos os testes.

d) A permeabilidade absoluta baseada na Lei de Darcy foi determinada variando-se o fluxo (Q) de 1ml/min a 10ml/min. A pressão P para cada fluxo foi registrada e foi plotado um gráfico $Q \times P/\mu L$ encontrando-se assim a permeabilidade absoluta.

e) O óleo (Brent ou Prudhoe Bay) foi injetado no testemunho em vazão constante de 2ml/min até a pressão estabilizar. Neste ponto, a saturação irreduzível de água (S_{wi}) foi determinada pelo balanço de massa.

f) A salmoura foi injetada no testemunho em fluxo constante de 2ml/min deslocando o óleo até a sua saturação residual (s_{or}).

g) Mais salmoura foi injetada por 12h em fluxo baixo de $\frac{1}{2}$ ml/min para se obter o equilíbrio no testemunho e assegurar que verdadeira saturação residual (s_{or}) foi alcançada.

h) Para minimizar a mobilização de óleo e obter a menor saturação de óleo residual antes da injeção da emulsão, o fluxo foi sistematicamente aumentado de 2 até 10 ml/min com a injeção de bancos de 10VP de salmoura para cada fluxo.

i) O último estágio do experimento foi a injeção de emulsão. Uma emulsão de uma específica formulação foi preparada utilizando óleo como fase dispersa, salmoura como fase contínua e emulsificante para estabilizar a emulsão. A emulsão foi injetada com fluxo constante. Durante o teste a pressão foi continuamente registrada em três pontos do testemunho ($L=3,81\text{cm}$ (1,5pol); $L=8,89\text{cm}$ (3,5pol); $L=15,24\text{cm}$ (6 pol)). Amostras do fluido para a medida da concentração também foram coletadas nestes pontos em vários momentos. O volume poroso de emulsão injetada variou em cada teste (Fig. 5-1).

j) A permeabilidade efetiva foi calculada utilizando-se a Lei de Darcy. A permeabilidade foi normalizada com respeito à permeabilidade inicial antes da injeção da emulsão (5.1.1). Gráficos da permeabilidade normalizada versus tempo em volumes porosos foram apresentados para cada teste.

$$\frac{k}{k_0} = \frac{\left(\frac{Q}{\Delta P/L} \right)}{\left(\frac{Q}{\Delta P/L} \right)_0} \quad (5.1.1)$$

k) Foram efetuadas a contagem (concentração) e a distribuição por tamanhos das partículas através de um contador de partículas em cada amostra de fluido coletada. A concentração de cada amostra foi normalizada pela concentração da emulsão injetada e gráficos da concentração normalizada versus tempo em volumes porosos foram apresentados para cada teste. Foram também apresentados gráficos da distribuição por tamanhos das partículas em tempos (em VP) diferentes para alguns testes.

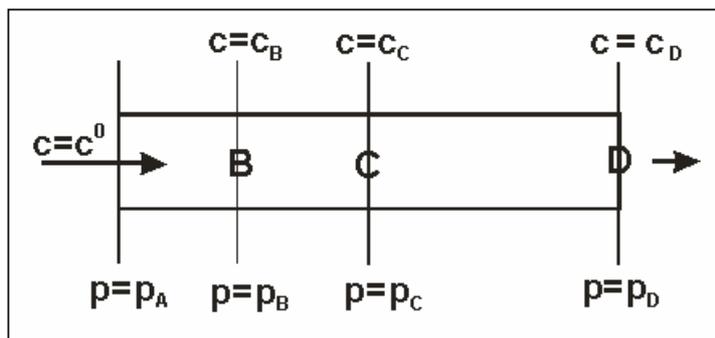


Figura 5-1 Esquema de testes de Mendez (1999)

Para utilizar o modelo proposto para ajustar os dados de Mendez, tivemos que adaptá-lo para uma situação onde a injeção da emulsão é feita em uma velocidade inferior à da formação do óleo residual (ver item 'h' da descrição dos testes acima). Neste caso, o fluxo apresenta quatro regiões (Fig. 5-1), onde a primeira, segunda e terceira (de transição) regiões correspondem ao modelo clássico (sem liberação de partículas) e a quarta região ao modelo com *snap-off*.

Na Figura 5-1 vemos que a geração do *snap-off* se inicia na entrada do testemunho a partir de um determinado tempo (tempo crítico, t'_{DCri}) dado pela equação (5.1.2) quando a deposição alcança o valor suficiente para iniciar o processo de *snap-off* (a deposição crítica, S_{cri}) dada pela equação (5.1.3), onde N_c é o número capilar de injeção e N_{c0} o número capilar da formação do óleo residual :

$$t'_{DCri} = -\frac{S_m}{\lambda} \ln\left(\frac{S_m - S_{cri}}{S_m}\right) \quad (5.1.2)$$

$$S_{cri} = \frac{1}{\beta\phi c^0} \left(\frac{N_{c0}}{N_c} - 1\right) \quad (5.1.3)$$

No apêndice 'F' apresentamos detalhes desta formulação.

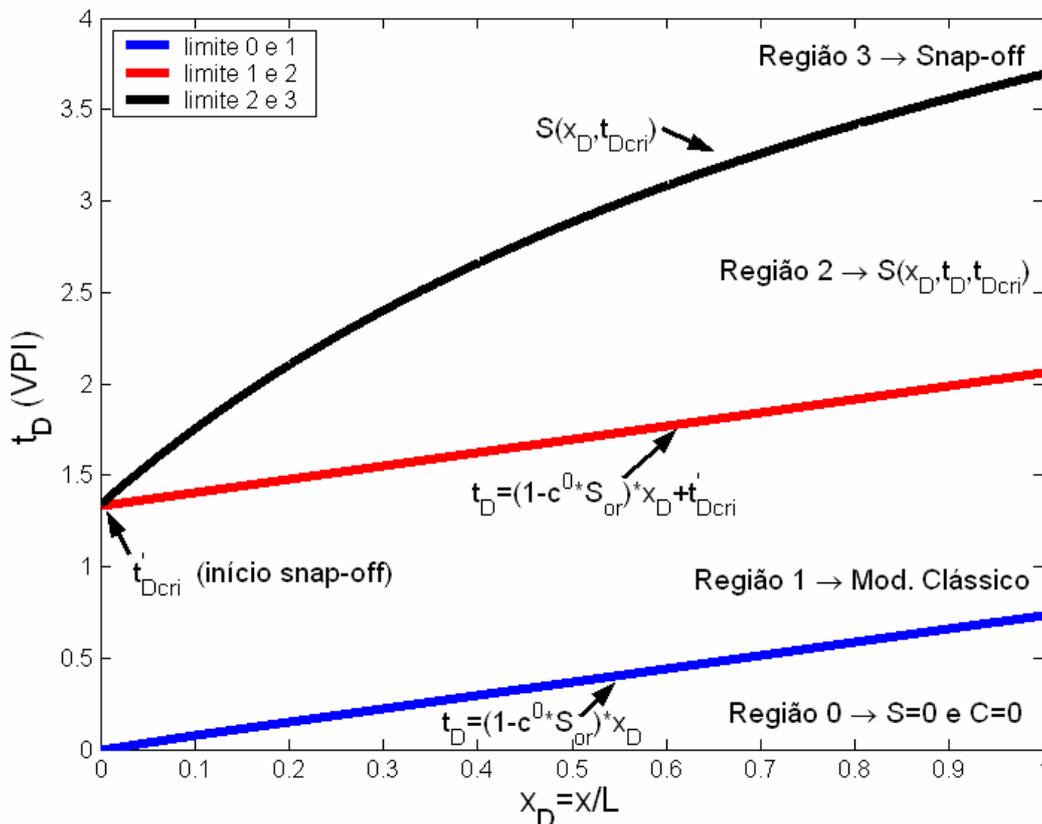


Figura 5-2 – Modelo para injeção de emulsão com velocidade inferior à da formação do óleo residual

Inicialmente, ajustamos o teste 4 onde foi injetada a emulsão num testemunho sem óleo residual (modelo clássico). O ajuste foi efetuado apenas para o testemunho total (Fig. 5-3 e 5-4) e os parâmetros encontrados (β , λ_0 e σ_m) aplicados nas seções B+C (Fig 5-5 e 5-6) e seção B (Fig. 5-7 e 5-8). O ajuste apresentou resultados satisfatórios.

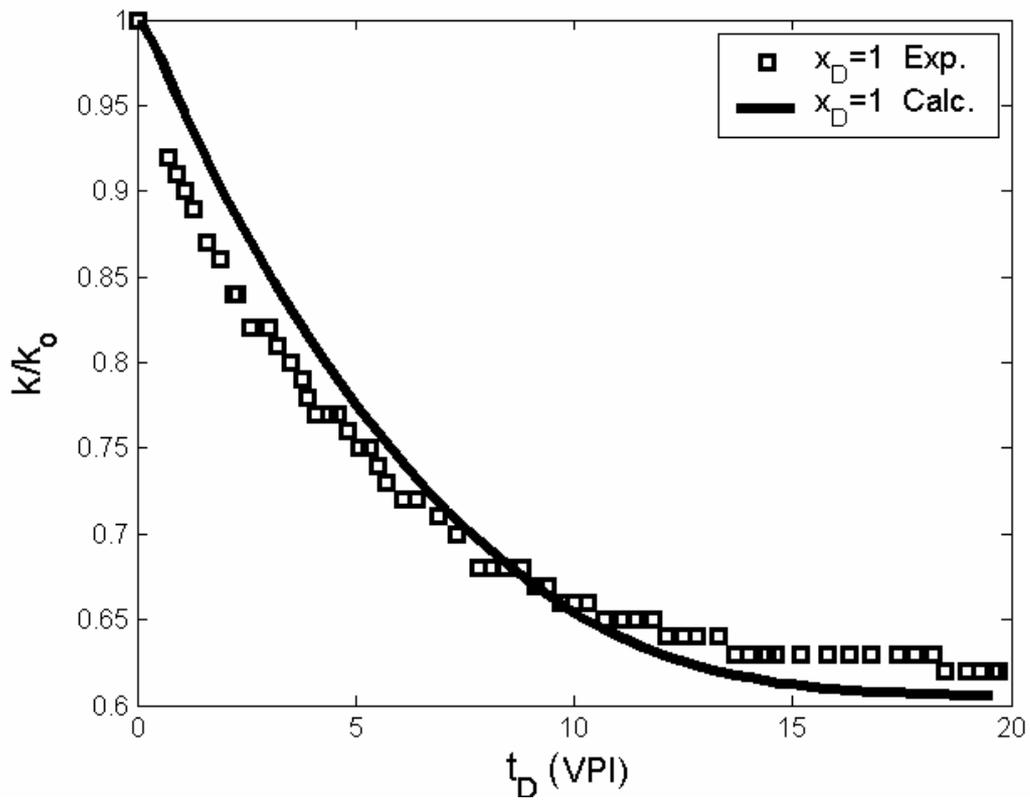


Figura 5-3 Ajuste da permeabilidade do testemunho total do teste 4, sem óleo residual (MENDEZ,1999).

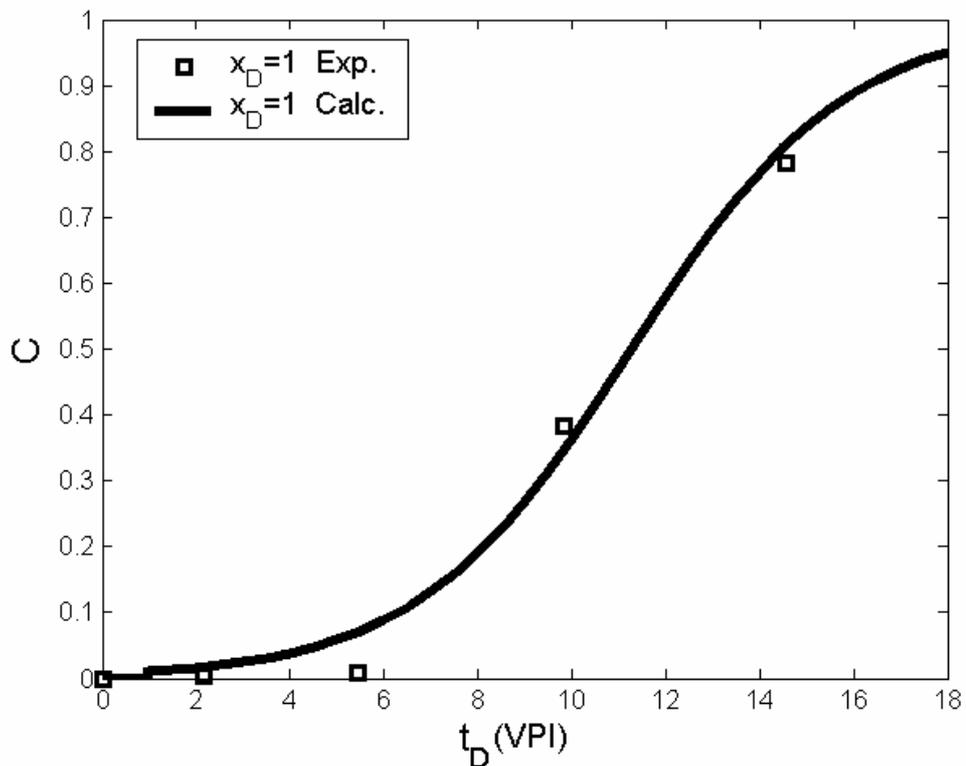


Figura 5-4 Ajuste da concentração no efluente do testemunho total teste 4, sem óleo residual (MENDEZ,1999).

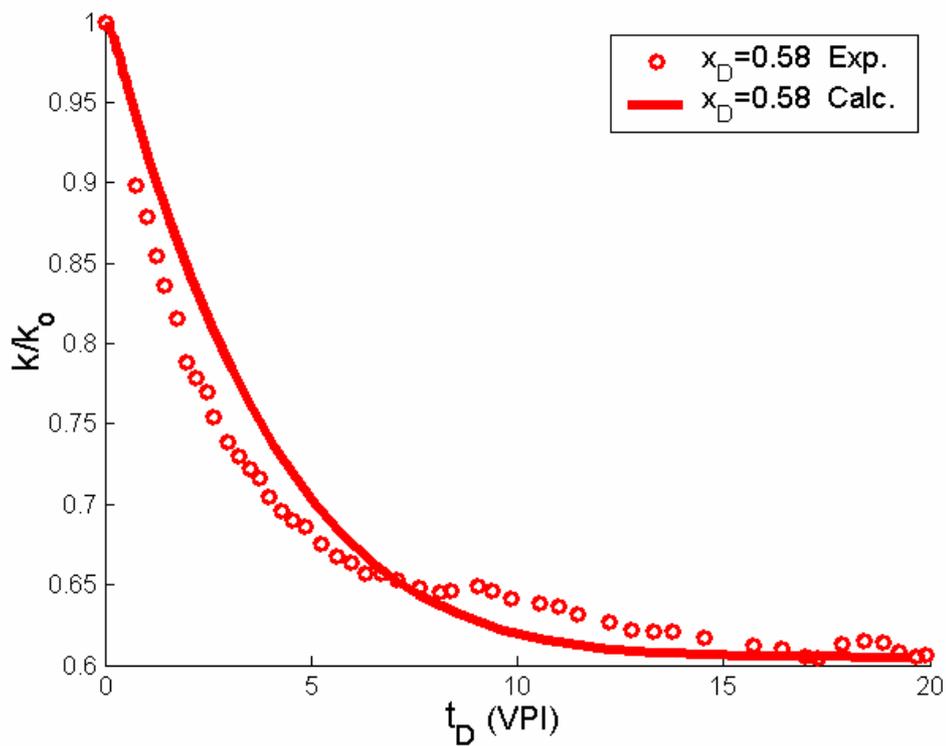


Figura 5-5 Ajuste da permeabilidade da seção B+C do teste 4, sem óleo residual (MENDEZ,1999).

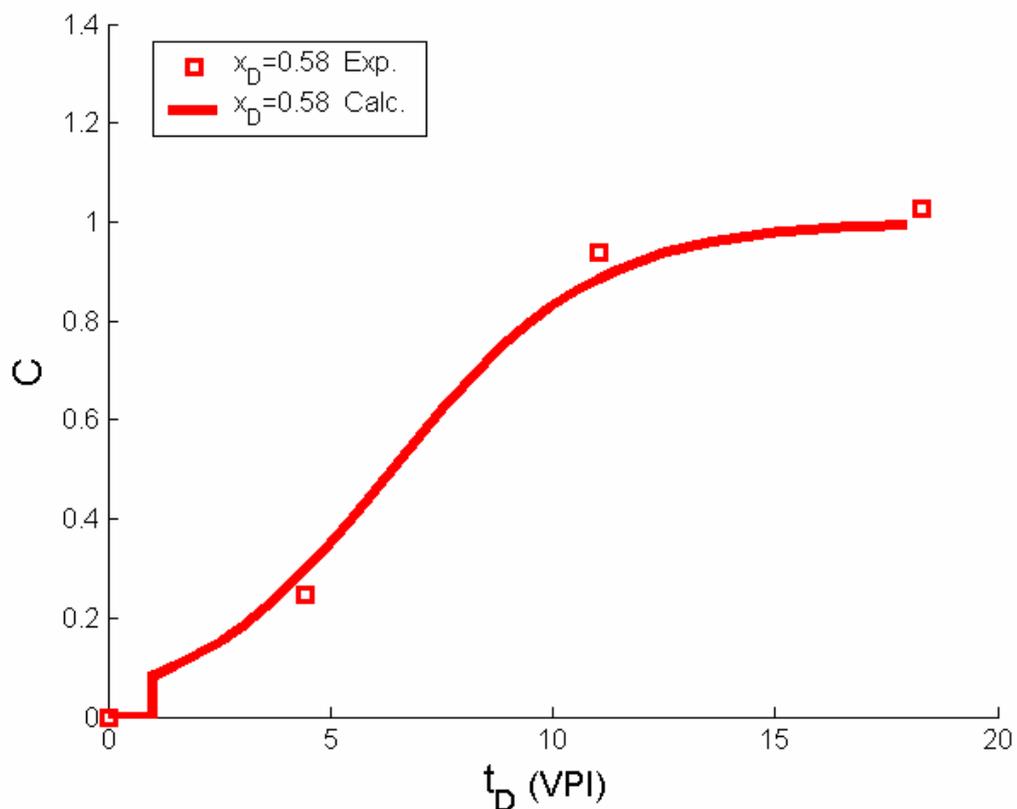


Figura 5-6 Ajuste da concentração no efluente da seção B+C do teste 4, sem óleo residual (MENDEZ,1999).

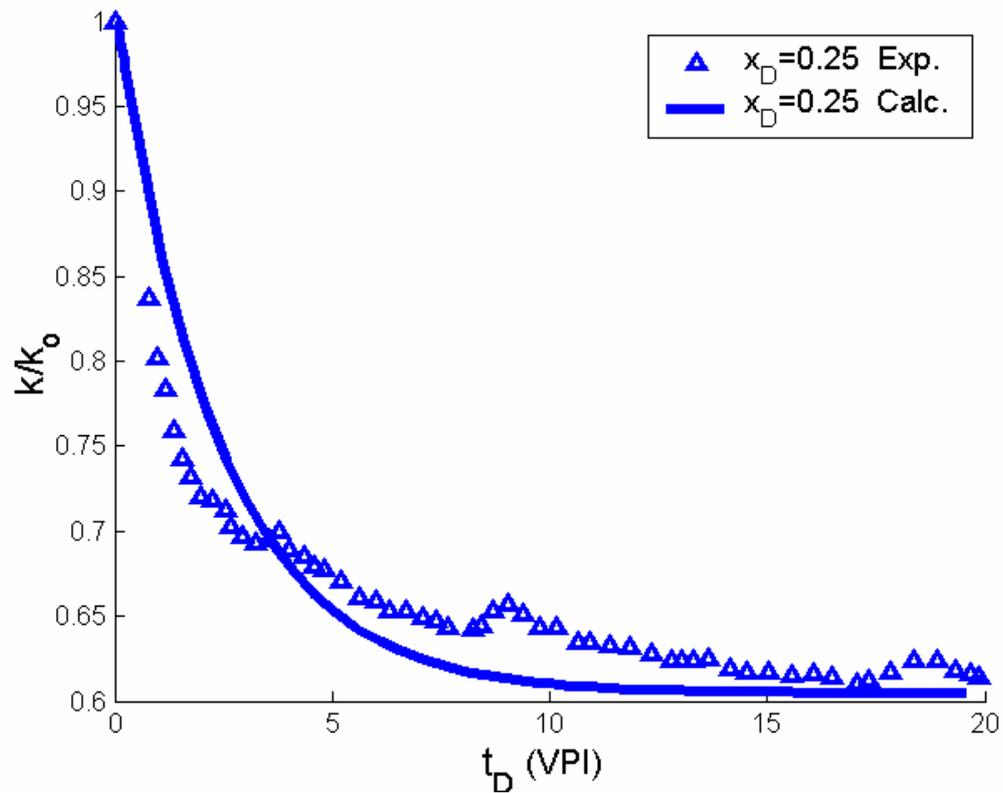


Figura 5-7 Ajuste da permeabilidade da seção B do teste 4, sem óleo residual (MENDEZ,1999).

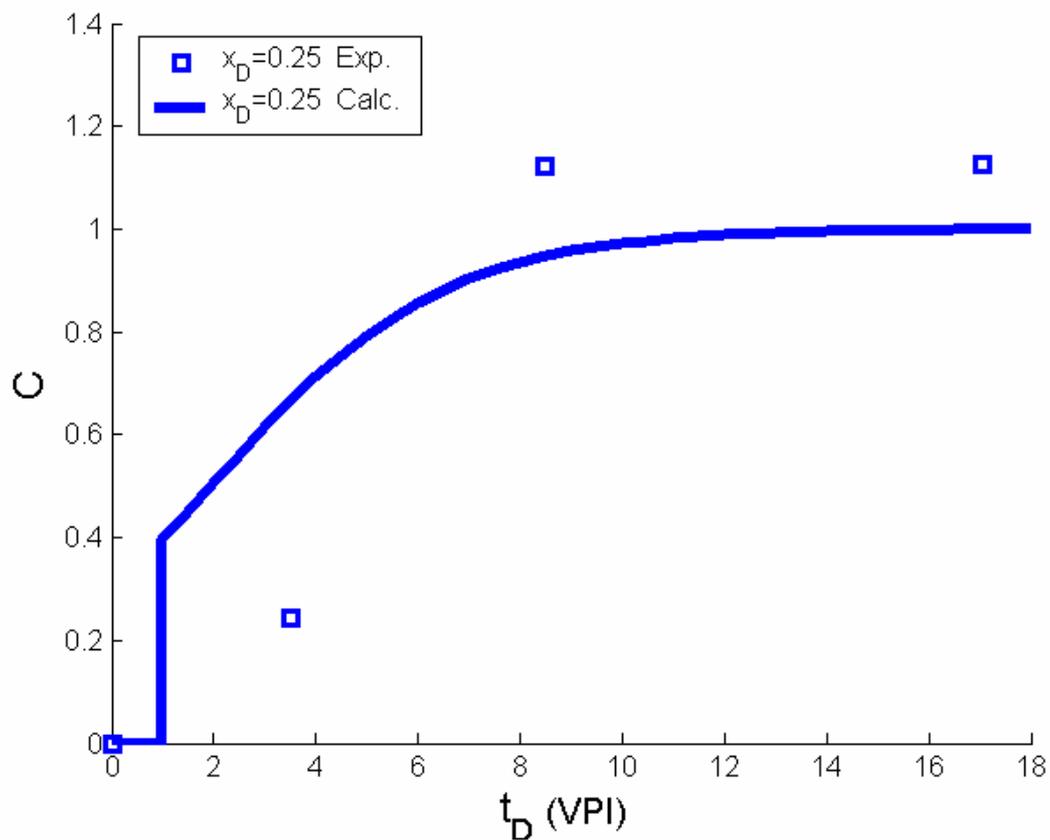


Figura 5-8 Ajuste da concentração no efluente da seção B do teste 4, sem óleo residual (MENDEZ,1999).

Posteriormente, efetuamos ajuste com o modelo modificado para testes com a presença de óleo residual. Apresentamos abaixo os resultados para o teste 5. O ajuste foi efetuado apenas para o testemunho total (Fig. 5-9 e 5-10) e os parâmetros encontrados (β , λ_0 e σ_m) aplicados nas seções B+C (Fig 5-11 e 5-12) e seção B (Fig. 5-13 e 5-14). Nos gráficos, apresentamos também o resultado do teste sem óleo residual para um testemunho com as mesmas características.

Na Tabela 5.1 vemos que com a presença de óleo residual os parâmetros dano de formação, coeficiente de filtração e deposição máxima são maiores que os respectivos parâmetros quando não há óleo residual.

Tabela 5.1 Parâmetros calculados nos ajustes dos testes 4 e 5

Testes de Mendez (1999)	s_{or}	c^0 (ppm)	k_0 (md)	β	λ_0	$S_m = (\sigma_m / \Phi c^0)$ (adimensional)
Sem óleo residual	0	1000	189	317.7	29.8	10.3
Com óleo residual	0.34	1000	186	2100	110	90

Pelos gráficos (Fig 5-9 a 5-14) vemos que o modelo ajusta bem a permeabilidade, mas não ajusta a concentração. Resultados semelhantes acontecem com outros testes onde há a presença de óleo residual.

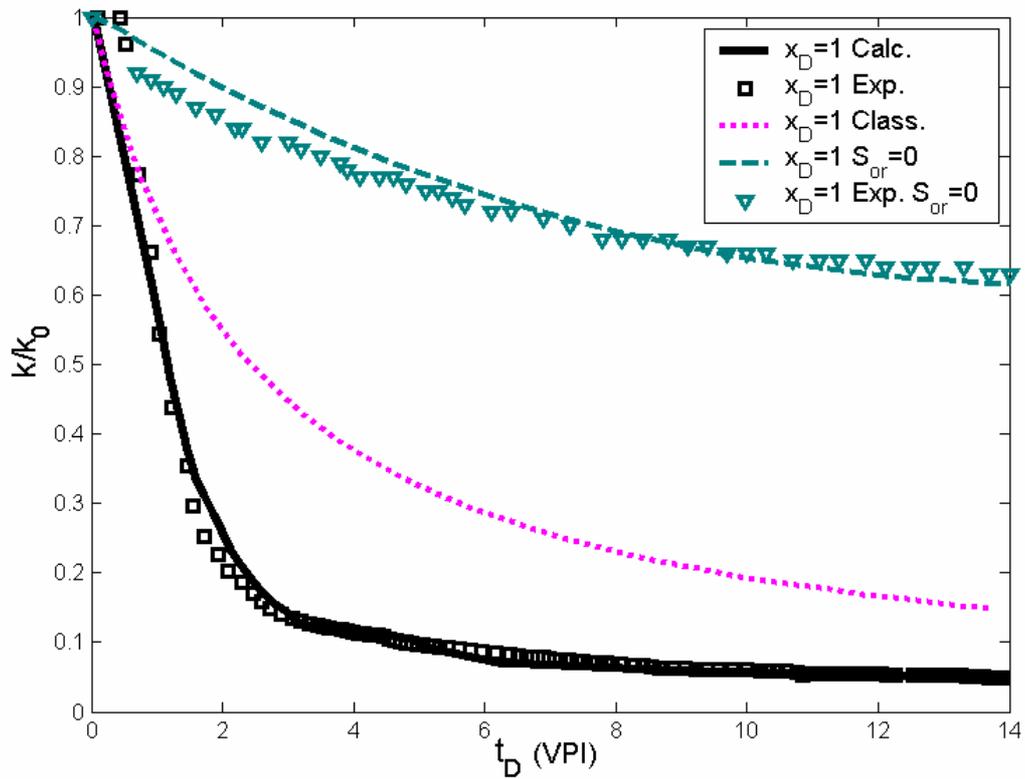


Figura 5-9 Ajuste da permeabilidade do testemunho total do teste 5, com óleo residual (MENDEZ,1999).

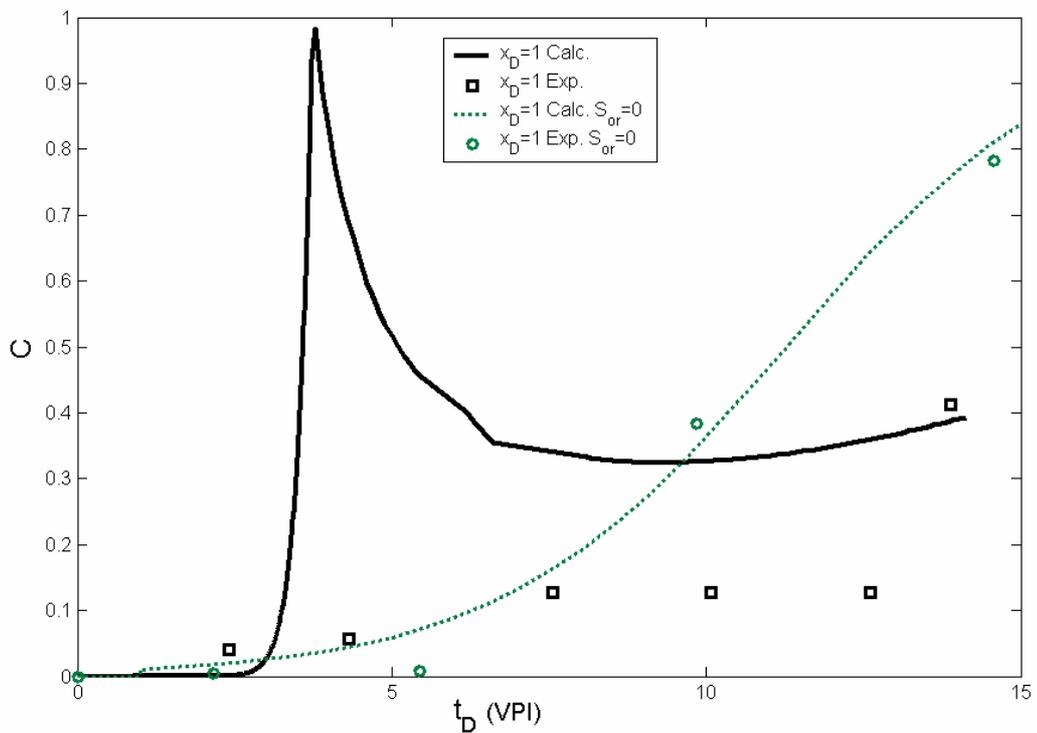


Figura 5-10 Ajuste da concentração no efluente do testemunho total teste 5, com óleo residual (MENDEZ,1999).

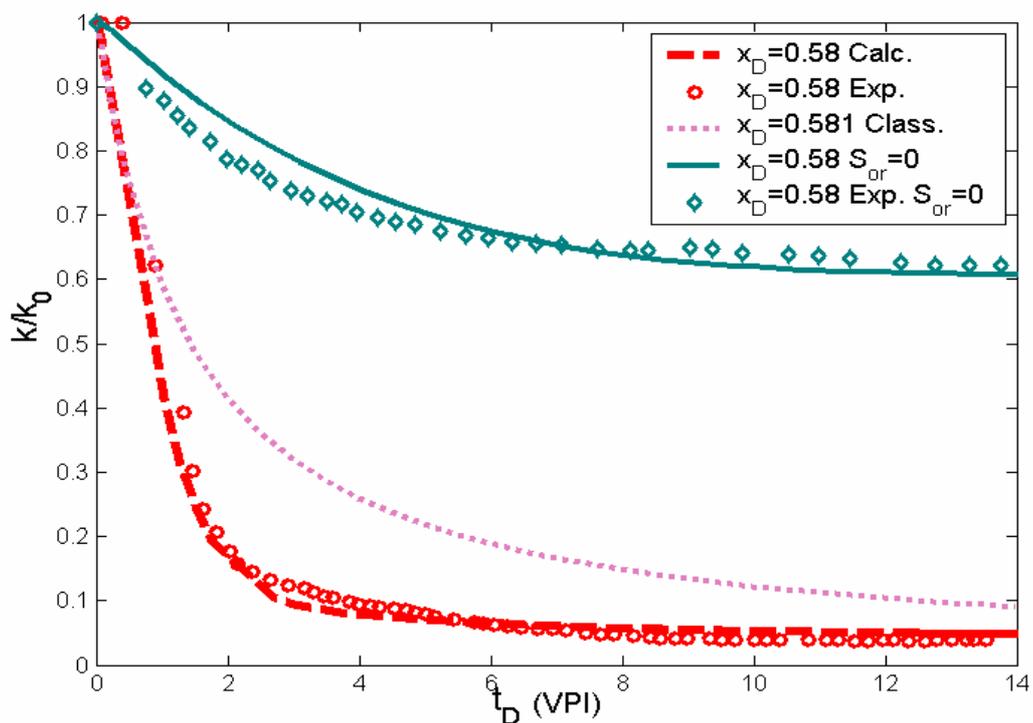


Figura 5-11 Ajuste da permeabilidade da seção B+C do teste 5, com óleo residual (MENDEZ,1999).

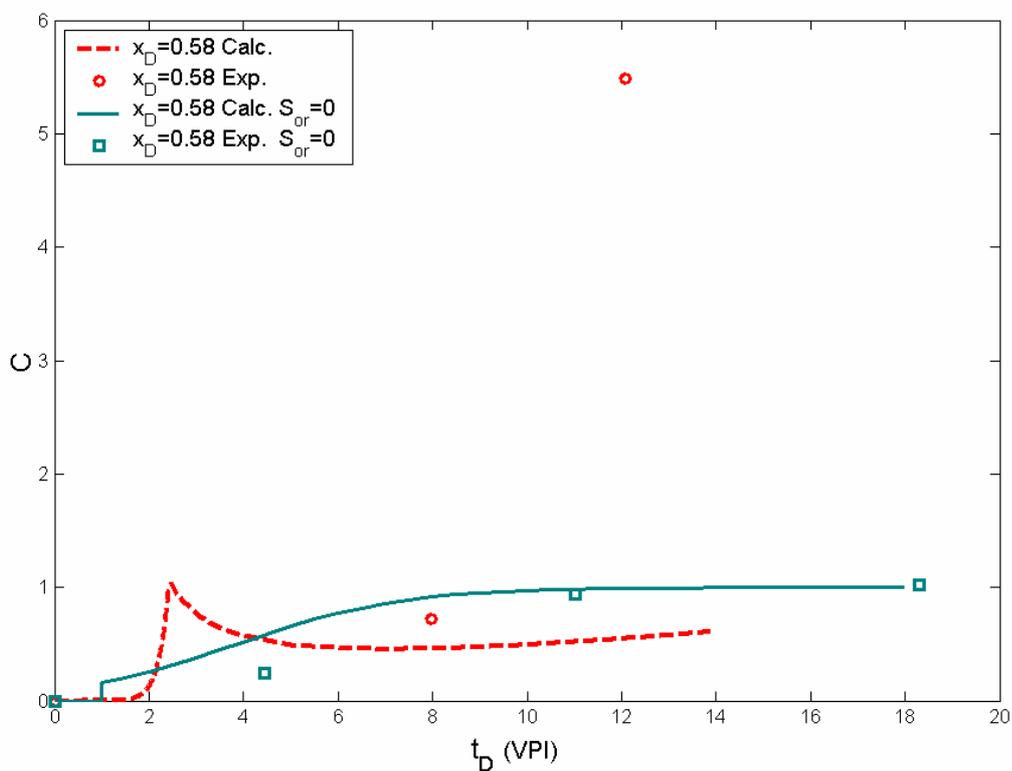


Figura 5-12 Ajuste da concentração no efluente da seção B+C do teste 5, com óleo residual (MENDEZ,1999).

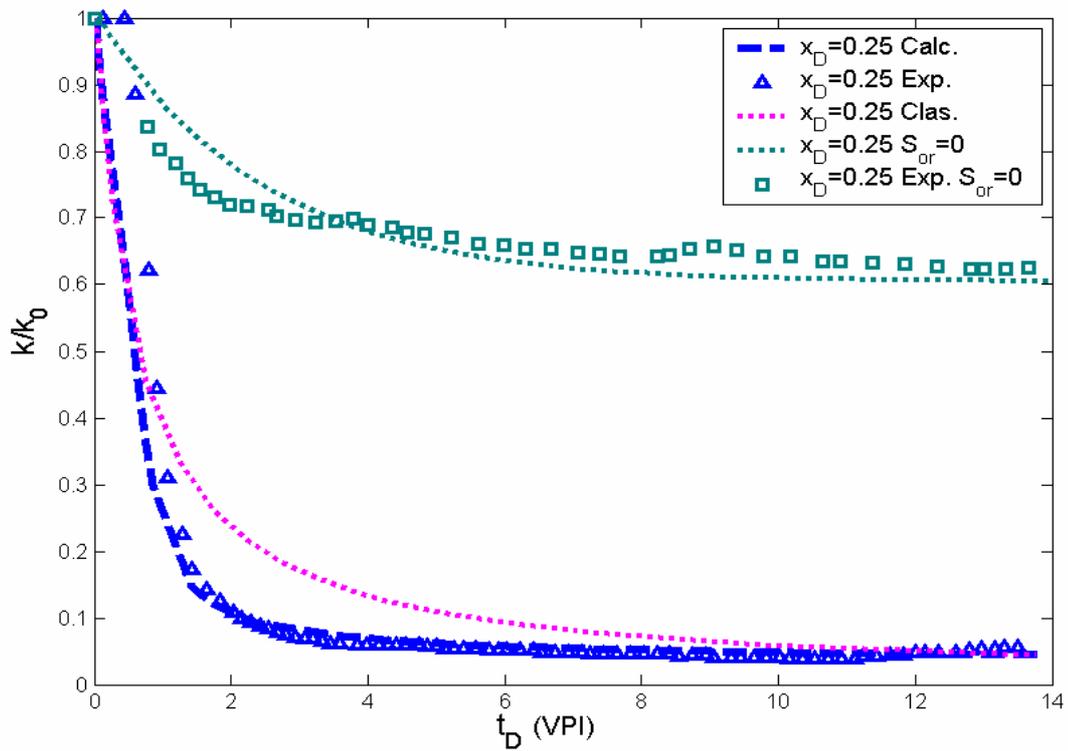


Figura 5-13 Ajuste da permeabilidade da seção B do teste 5, com óleo residual (MENDEZ,1999).

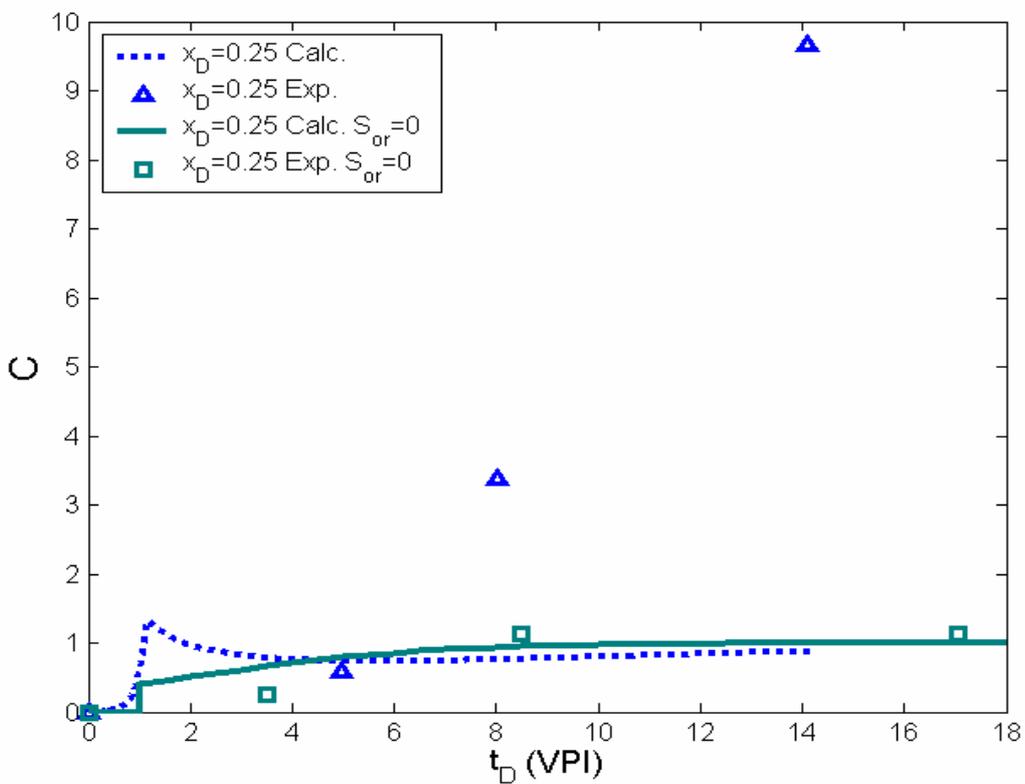


Figura 5-14 Ajuste da concentração no efluente da seção B do teste 5, com óleo residual (MENDEZ,1999).

Acreditamos que o motivo para que o ajuste não concorde se deva, principalmente, a dois fatores:

a) injeção da emulsão com velocidade inferior ao da geração do óleo residual, portanto, durante um determinado tempo, a emulsão causa dano e, onde outros fatores que não consideramos estão atuando (por exemplo, a mudança da tensão superficial pela água da emulsão com surfactantes).

b) injeção de emulsão com tamanho médio de gotas menor que o das gotas produzidas pelo óleo residual. Mendez mede a concentração das gotas no efluente onde o tamanho médio aumenta com a injeção ao contrário do que acontece quando a injeção não mobiliza o óleo residual (MENDEZ, 1999 e SCHMIDT, 1982).

5.2 Modelo de Filtração de Emulsão Contendo Partículas com Dois Tamanhos Diferentes

O modelo matemático proposto no capítulo 3 assume que as partículas da emulsão e as liberadas pelo óleo residual possuem as mesmas propriedades de filtração e dano de formação. Entretanto, esta consideração não é exata. MENDEZ (1999) observou que, partículas maiores que as injetadas apareceram no efluente. Isto pode ser explicado pela diferença de tamanhos entre as partículas injetadas e as gotas do *snap-off*.

Considerando que as partículas injetadas e as liberadas pelo óleo residual têm diferentes tamanhos e, conseqüentemente, diferentes coeficientes de filtração, vamos deduzir equações para a filtração de duas famílias de partículas oleosas.

O índice “1” refere-se a partículas injetadas e o “2” a partículas liberadas por *snap-off*.

A equação do balanço de massa para partículas injetadas é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi(1-s_{or})c_1 + \sigma_1) + U \frac{\partial c_1}{\partial x} = 0 \quad (5.2.1)$$

O óleo está presente em três estados: partículas em suspensão, partículas retidas e óleo residual. Assim, o balanço de massa para o óleo é:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi(1-s_{or})c_2 + \sigma_2 + \phi s_{or}) + U \frac{\partial c_2}{\partial x} = 0 \quad (5.2.2)$$

A taxa de deposição, para cada uma das famílias de partículas, é proporcional ao fluxo da emulsão, à concentração de cada uma e ao coeficiente de proporcionalidade (coeficiente de filtração) dependente das concentrações das partículas retidas (ALVAREZ *et. al.*, 2006):

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial t} = \lambda_1'(\sigma_1, \sigma_2) U c_1 \quad (5.2.3)$$

$$\frac{\partial \sigma_2}{\partial t} = \lambda_2'(\sigma_1, \sigma_2) U c_2 \quad (5.2.4)$$

Cada um dos coeficientes de filtração depende das duas concentrações de partículas retidas.

A retenção de partículas, com concentração σ , resulta em decréscimo da permeabilidade (PANG e SHARMA, 1997, WENBERG e SHARMA, 1997, BEDRIKOVETSKY *et. al.*, 2001). Aqui, vamos assumir um mesmo decréscimo da permeabilidade na presença de óleo residual:

$$U = - \frac{k(\sigma_1, \sigma_2) k_{rw}(s_{or})}{\mu_w} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (5.2.5)$$

onde a função dano de formação tem a forma:

$$k(\sigma_1, \sigma_2) = \frac{k_0}{1 + \beta_1 \sigma_1 + \beta_2 \sigma_2} \quad (5.2.6)$$

a qual provê a adição dois fatores causados pela deposição de cada um dos tipos de partículas.

A saturação do óleo residual na presença de partículas retidas é obtida da CDC pela multiplicação do número capilar por $k(0)/k$:

$$s_{or}(\sigma_1, \sigma_2) = g \left(N_c \frac{k(0,0)}{k(\sigma_1, \sigma_2)} \right) \quad (5.2.7)$$

As quatro equações (5.2.1), (5.2.2), (5.2.3) e (5.2.4) determinam variáveis desconhecidas c_1, c_2, σ_1 e σ_2 . O sistema contém quatro funções fenomenológicas: funções de filtração para dois tipos de partículas, curva de dessaturação capilar e função dano de formação.

O gradiente de pressão é determinado pela equação 5.2.5.

5.3 Determinação da Permeabilidade Relativa e do Óleo Residual para Testes com Injeção de Água Produzida

Uma das possibilidades no gerenciamento de água produzida é a sua injeção em outro campo de petróleo. Neste caso, realiza-se teste de injeção da água produzida em testemunhos para a determinação da permeabilidade relativa utilizando os métodos JBN (JOHNSON *et. al.*, 1957) ou JR (JONES e ROSZELLE, 1978) para o tratamento de dados. Nesta seção, vamos apresentar uma correção necessária para estimar as condições de reservatório.

Os dados laboratoriais mostram que o coeficiente de filtração (λ) nunca é menor que 0,1 1/m (PANG e SHARMA, 1997, WENBERG e SHARMA, 1997, ALVAREZ *et.al.*, 2006, BEDRIKOVETSKY *et. al.*, 2001). A distância média de captura das partículas é $1/\lambda$. Após $1/\lambda=10\text{m}$, a maior parte das partículas foi capturada, isto é, podemos considerar que a água que desloca o óleo está isenta de partículas após 10m da vizinhança do poço injetor. Portanto, devemos retirar as partículas de óleo da água nos testes para a determinação da permeabilidade relativa com injeção de água produzida.

Vamos assumir que, na realização dos testes, a retirada das partículas oleosas não foi efetuada e que o testemunho contenha óleo residual. Nestas condições, com injeção a vazão constante, a captura de partículas reduz a permeabilidade causando um gradiente adicional de pressão. O aumento do gradiente de pressão mobiliza os gânglios de óleo residual, reduzindo a saturação de óleo residual comparado com a injeção de água limpa.

Como dito acima, além de 10m de sua vizinhança, o poço injetor funciona como um filtro para partículas oleosas, isto é, o real valor do óleo residual deve ser medido com a injeção de água limpa.

Portanto, se a saturação de óleo residual foi obtida pela injeção de água produzida no testemunho, devemos corrigi-la pelo fator dano de formação. A equação (3.2.3) mostra a relação entre a saturação de óleo residual com e sem partículas capturadas. Considerando o testemunho curto o suficiente para que a concentração da suspensão dentro dele seja considerada constante, podemos estimar a concentração de partículas retidas a partir de (3.4.1):

$$\sigma = \lambda c^0 U t \quad (5.3.1)$$

onde t é o tempo de injeção.

Vamos, também, assumir que a curva de dessaturação capilar (CDC) para o testemunho/óleo é conhecida. Assim, a correção da saturação de óleo residual pelo fator dano de formação é dada por:

$$s\left(\lambda c^0 U t, \frac{U \mu_w}{\sigma_{ow}}\right) = s\left(\lambda c^0 U t, \frac{U \mu_w}{\sigma_{ow}(1 + \beta \lambda c^0 U t)}\right) \quad (5.3.2)$$

onde $s(N_c)$ é a curva de dessaturação capilar (Fig. 4-1).

Na Figura 3-3 mostramos que se $s_{or}(N_c)$ é a medida do óleo residual após a injeção de água produzida, a real saturação de óleo residual esperada para o reservatório é menor que a da vizinhança do poço injetor e é dada por $s_{or}(N_c/(1 + \beta \lambda c^0 U t))$.

Os coeficientes de filtração e dano de formação devem ser conhecidos para o uso da equação (5.3.2). Sugerimos o uso do método dos três pontos para o cálculo de λ e β (BEDRIKOVETSKY *et. al.*, 2001 e 2003). Deve-se medir o gradiente de pressão no testemunho todo e, também, em um ponto intermediário do testemunho para se efetuar o cálculo de λ e β pelo método dos três pontos.

Conclusões

Do modelo analítico para o fluxo de emulsão óleo/água em rochas contendo óleo residual proposto neste trabalho, podemos fazer as seguintes conclusões:

- 1- A liberação de gotas de óleo residual durante a injeção da emulsão resulta em significativa redução da permeabilidade e aumento da concentração no efluente, se comparado com o fluxo de emulsão em rochas sem óleo residual.
- 2- A deposição de partículas ocorre continuamente para o caso onde o coeficiente de filtração é constante. O impacto da liberação de partículas diminui com a redução de óleo residual no tempo, porém nunca é nulo.
- 3- Para o caso onde temos a função de filtração linear, a deposição de partículas injetadas termina quando a retenção alcança o limite máximo. A partir deste ponto, a liberação de gotas pelo óleo residual também termina e o sistema de filtração estabiliza.
- 4- As curvas para a concentração do efluente no tempo, o gradiente de pressão no testemunho e a retenção de partículas no tempo e ao longo do testemunho podem ser descritas por expressões analíticas.
- 5- Quando o tamanho médio das gotas injetadas e liberadas pelo óleo residual são diferentes, o modelo deve ser modificado para um sistema com equações de balanço de massa e filtração para duas famílias de partículas.
- 6- O cálculo do óleo residual do testemunho, medido com a injeção de água produzida, deve ser ajustado para o mesmo resultado obtido pela injeção de água "limpa". Para tanto, deve-se calcular um novo número capilar na CDC pela divisão do número capilar pelo mesmo fator de dano à formação.

Novidades Científicas

- 1- Desenvolvimento de método de construção de curva de dessaturação na presença de partículas retidas.
- 2- Dedução de modelo analítico para processo de filtração profunda, onde há a presença de óleo residual, levando em consideração a mobilização dos gânglios de óleo.
- 3- Efeito de não monotonicidade do perfil de retenção das partículas.
- 4- Método de cálculo de óleo residual e permeabilidades relativas para testes efetuados com o deslocamento de óleo pela água produzida.
- 5- Dedução das equações básicas para filtração profunda das suspensões de mistura de partículas sólidas e líquidas.

Recomendações para Trabalhos Futuros

- 1- Ajustamento de dados laboratoriais sobre filtração profunda de água oleosa sem mobilização de óleo residual usando coeficientes de filtração e de dano de formação linear para investigar efeito de óleo residual nos coeficientes.
- 2- Generalizar método dos três pontos para coeficientes de filtração e de dano de formação linear.
- 3- Ajustamento de dados laboratoriais sobre filtração profunda de água oleosa com mobilização de óleo residual usando coeficientes de filtração e de dano de formação linear com o modelo proposto.
- 4- Desenvolver modelo de filtração profunda de água oleosa levando em consideração a deformação e *snap-off* de gotas.
- 5- Estudo laboratorial de filtração profunda de água oleosa com medidas de distribuição das partículas por tamanho na entrada e na saída dos testemunhos com e sem óleo residual.

Referências Bibliográficas

- ABRAMS, A., (1975), The Influence of Fluid Viscosity, Interfacial Tension and Flow Velocity on Residual Oil Saturation Left by Waterflood, *Society of Petroleum Engineers Journal* , 437-447, (SPE-5050).
- AL-RIYAMY, K., SHARMA M.M., (2004), Filtration Properties of Oil-in-Water Emulsions Containing Solids, *SPE Drilling & Completion*, 164-172, (SPE 89015).
- AL-ABDUWANI, F.A.H., HIME G., ALVAREZ A., FARAJZADEH R., (2005), New Experimental and Modelling Approach for the Quantification of Internal Filtration, *SPE European Formation Damage Conference*, Sheveningen, The Netherlands, (SPE 94634).
- ALI, M.A.J., CURRIE, P.K., (2005), Effect of Residual Oil on the Particle Deposition Profile in Deep-Bed Filtration During Produced Water Reinjection, *SPE European Formation Damage Conference*, Sheveningen, The Netherlands, (SPE-94483).

- ALI, M.A.J., CURRIE, P.K., SALMAN, M.J., (2005), Measurement of the Particle Deposition Profile in Deep-Bed Filtration During Produced Water Re-Injection, *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference*, Kingdom of Bahrain, (SPE-93056).
- ALVARADO, D.A., MARSDEN JR., S.S., (1979), Flow of Oil-in-Water Emulsions Through Tubes and Porous Media – *Society of Petroleum Engineers Journal*, 369-377, (SPE-5859).
- ALVAREZ, A. C., BEDRIKOVETSKY, P.G., HIME, G., MARCHESIN, D., RODRÍGUEZ, J. R., (2006), A fast inverse solver for the filtration function for flow of water with particles in porous media, *Journal of Inverse Problems*, 22:69-88.
- ARIOLA, A., WILLHITE, P.G., GREEN, W. D., (1983), Trapping of Oil Drops in a Noncircular Pore Throat and Mobilization Upon Contact with a Surfactant, *Society of Petroleum Engineers Journal*, 99-114, (SPE-9404).
- BEDRIKOVETSKY, P.G., MARCHESIN, D., SHECAIRA, F., SERRA, A. L., RESENDE, E., (2001), Characterization of Deep Bed Filtration System from Laboratory Pressure Drop Measurements, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 64(3):167-177.
- BEDRIKOVETSKY, P.G., TRAN, T.K., VAN DEN BROEK, W.M. G. T, MARCHESIN D., REZENDE E., SIQUEIRA, A., SERRA, A.L., SHECAIRA, F., (2003), Damage Characterization of Deep Bed Filtration from Pressure Measurements. *Journal SPE, Production & Facilities*, 18(2):119-128, (SPE-83673)
- BEDRIKOVETSKY, P.G., MARCHESIN, D., HIME, G., ALVAREZ, A., SIQUEIRA, A. G., SERRA, A. L., RODRIGUES, J. R. P., MARCHESIN, A., VINICIUS, M., (2004). Inverse Problems for Treatment of Laboratory Data on Injectivity Impairment, *International Symposium on Formation Damage Control*, Lafayette, Louisiana, EUA, (SPE-86523).

- CHATZIS, I., KUNTAMUKKULA, M.S., MORROW, R. N., (1988), Effect of Capillary Number on the Microstructure of Residual Oil in Strongly Water-Wet Sandstone, *SPE – Reservoir Engineering*, 902-912, (SPE-13213).
- CHATZIS, I., MORROW, R. N., (1984), Correlation of Capillary Number Relationships for Sandstone, *Society of Petroleum Engineers Journal*, 555-562, (SPE-10114).
- CHATZIS, I., MORROW, N. R., LIM, H.T., (1983), Magnitude and Detailed Structure of Residual Oil Saturation, *Society of Petroleum Engineers Journal*, 311-326, (SPE-10681).
- CHAUVETEAU, G., NABZAR, L., COSTE, J.-P., (1998), Physics and Modelling of Permeability Damage Induced by Particle Deposition, *SPE Formation Damage Control Conference*, Lafayette, Louisiana, EUA, (SPE-39463).
- DELSHAD, M., BHUYAN, D., POPE, G.A., LAKE, L.W., (1986), Effect of Capillary Number on the Residual Saturation of a Three-Phase Micellar Solution, *SPE/DOE*, 399-410, (SPE-14911).
- FRENCH, T.R., BROZ, J.S., LORENZ, P.B., BERTUS, K.M., (1986), Use of Emulsions for Mobility Control During Steamflooding, *56° California Regional Meeting of the Society of Petroleum Engineers*, Oakland, California, EUA, (SPE-15052)
- FURTADO, C.J.A., SIQUEIRA, A.G., SOUZA, A.L.S., CORREA, A.C.F., MENDES, R.A., (2005), Produced Water Reinjection in Petrobras Fields: Challenges and Perspectives, *SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*, Rio de Janeiro, Brasil, (SPE-94705)
- HERZIG, J.P., LECLERC, D.M., LE GOFF, P., (1970), Flow of suspensions through porous media -- application to deep filtration. - *Ind. Eng. Chem.* 62 (5):8 –35.

- IWASAKI, T., (1937), Some notes on sand filtration, *Journal of the American Water Works Association*, 29:1591–1602.
- IVES, K.J., (1963), Simplified Rational Analysis of Filter Behavior, *Proceedings of Institute of Civil Engineering*, 25:345-364 (paper 6661).
- JANSSEN, P.H., (2000), *Characterization of oil-water mixtures produced in high-watercut oil wells*, Ph.D. thesis, Delft University of Technology, Holanda, ISBN-90-9013850.
- JOHNSON JR., C.E., (1975), Status of Caustic and Emulsion Methods, *Journal of Petroleum Technology*, 85-92, (SPE-5561)
- JOHNSON, E.F., BOSSLER, D.P., NAUMANN, V.O., (1957), Calculation of Relative Permeability from Displacement Experiments, *AIME* 216:370-372 (SPE-1023).
- JONES, S.C., ROSZELLE, W.O., (1978), Graphical Techniques for Determining Relative Permeability From Displacement Experiments, *Journal of Petroleum Technology*, 807:817, (SPE-6045).
- KHAMBHARATANA, F., THOMAS, S., FAROUQ ALI, S.M, (1998), Macroemulsion Rheology and Drop Capture Mechanism During Flow in Porous Media, *SPE International Oil and Gas Conference and Exhibition in China*, Beijing, China, (SPE-48910)
- KHAMBHARATANA, F., (1993), *Flow Emulsions in Porous Média*, Ph.D. thesis, University of Alberta, Canadá.
- KOVSCHEK, A.R., RADKE, C.J., (1996), Gas Bubble Snap-Off Under Pressure-Driven Flow In Constricted Noncircular Capillaries, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 117:55-76.
- LAKE, L.W., (1989), *Enhanced Oil Recovery*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NY, EUA.
- McAULIFFE, C. D., (1973a), Oil-in-Water Emulsions and Their Flow Properties in PorousMedia, *Journal of Petroleum Technology*, 727-733 (SPE-4369).

- McAULIFFE, C. D., (1973b), Crude-Oil-in-Water Emulsions To Improve Fluid Flow in an Oil Reservoir, *Journal of Petroleum Technology*, 721-726 (SPE-4370).
- MENDEZ, Z.C., (1999), *Flow of Dilute Oil-in-Water Emulsions in Porous Media*, Ph.D. thesis, University of Texas, Austin, EUA.
- MORROW, N. R., CHATZIS, I., TABER, J.J., (1988), Entrapment and Mobilization of Residual Oil in Bead Packs, *SPE*, 3(3):927-934 (SPE-14423).
- OLBRITCH, W.L., (1996), Pore-Scale Prototypes Of Multiphase Flow In Porous Media, *Annu. Rev. Fluid. Mech.* 28:187-213
- PANG, S., SHARMA, M.M., (1997), A Model for Predicting Injectivity Decline in Water-Injection Wells, *SPEFE*, 12(3):194-201 (SPE-28489).
- PAYATAKES, A. C., TIEN, C., TURIAN, R. M., (1973), A new model for granular porous media. I. Model formulation, *AIChE J.*, 19(1), 58-76.
- RATHMELL, J.J., BRAUN, P.H., PERKINS, T.K., (1973), Reservoir Waterflood Residual Oil Saturation from Laboratory Tests , *Journal of Petroleum Technology*, 175-185, (SPE-3785).
- ROOF, J.G., (1970), Snap-Off of Oil Droplets in Water-Wet Pores, *Society of Petroleum Engineers Journal*, 85-90, (SPE-2504).
- ROQUE C., CHAUVETEAU G., RENARD M., THIBAUT G., BOUTECA, M., ROCHON J., (1995), Mechanisms of Formation Damage by Retention of Particles Suspended in Injection Water, *SPE European Formation Damage Conference*, The Hague, Holanda, (SPE-30110).
- SCHMIDT, D.P., SOO, H., RADKE, C.J., (1984), Linear Oil Displacement by the Emulsion Entrapment Process, *Society of Petroleum Engineers Journal*, 351-360, (SPE-11333).

- SCHMIDT, D.P, (1982), *Linear Oil Displacement by the Emulsion Entrapment Process*, MSc Thesis, California University, Berkeley, EUA.
- SHARMA, M. M., YORTSOS, Y. C., (1987), Transport of Particulate Suspensions in Porous Media: Model Formulation. *AIChE J.*, 33 (10):1636:1643.
- SOO, H., RADKE, C.J., (1984), The Flow Mechanism of Dilute, Stable Emulsions in Porous Media, *Ind. Eng. Chem. Fundam.* 23:342-347.
- SOO, H., RADKE, C.J., (1986a), A Filtration Model for the Flow of Dilute, Stable Emulsions in Porous Media – I Theory, *Chemical Engineering Science*, 41(2):263-272.
- SOO, H., RADKE, C.J., (1986b), A Filtration Model for the Flow of Dilute, Stable Emulsions in Porous Media – II Parameter Evaluation and Estimation. *Chemical Engineering Science*, 41(2).
- SOUZA, A.L.S., FIGUEIREDO, M.W., KUCHPIL, C., BEZERRA, M.C., SIQUEIRA A.G., FURTADO, C.A., (2005), Water Management in Petrobras: Developments and Challenges, *Offshore Technology Conference*, Huston, Texas, EUA. (paper OTC17258.)
- STEGEMEIER, G.L., (1974), Relationship of Trapped Oil Saturation to Petrophysical Properties of Porous Media, *Improved Oil Recovery Symposium of the Society of Petroleum Engineers of AIME*, Tulsa, Okla., EUA, (SPE-4754).
- STEGEMEIER, G. L., (1977), Mechanisms of Entrapment and Mobilization of Oil in Porous Media, *in Improved oil Recovery by Surfactant and Polymer Flooding*, Shah, D.O. and Schechter, R. S., ed., Academic Press, New York.
- TABER, J.J., (1969), Dynamic and Static Forces Required To Remove a Discontinuous Oil Phase from Porous Media Containing Both Oil and Water, *Society of Petroleum Engineers Journal*, (SPE-2098).

- THOMAS, S., FAROUQ ALI, S.M., (1989), Flow of Emulsions in Porous Media, and Potential for Enhanced Oil Recovery, *J. Petroleum Science Engineering*, 3:121-136.
- TUFENKJI, N., ELIMELECH, M., (2004), Correlation Equation for Predicting Single-Collector Efficiency in Physicochemical Filtration in Saturated Porous Media, *Environ. Sci. Technol.* 38:529-536.
- WENBERG K. E., SHARMA M. M., (1997), Determination of the filtration coefficient and the transition time for water injection, *SPE European Formation Damage Conference, The Hague, Holanda*, (SPE-38181).
- WILLHITE, P.G, OKOYE, D.M., LOONEY, M.D., (1980), A Study of Oil Displacement by Micro-emulsion System – Mechanisms and Phase Behaviour, *Society of Petroleum Engineers Journal*, 459-472, (SPE-7580).
- ZHANG, N. S., TODD, A. C., (1993), An Experimental Investigation of the Formation Damage Caused by Produced Oily Water Injection, *Offshore Europe Conference, Aberdeen, Reino Unido*, (SPE-26702).

Apêndices

Apêndice A

Relação entre Saturação de Óleo Residual com a Presença e Ausência de Partículas Depositadas

A saturação de óleo residual é função do número capilar N_c .

$$N_c = \frac{U \mu_w}{\sigma_{wo}} \quad (\text{A-1})$$

O gráfico desta função, chamada curva de dessaturação capilar (CDC), foi apresentado na Fig. 3-3. Vamos deduzir a expressão para a saturação do óleo residual na presença de partículas depositadas no meio poroso:

$$s_{or} = g(N_c, \sigma) \quad (\text{A-2})$$

e expressá-la via a tradicional CDC sem partículas depositadas:

$$s_{or} = g(N_c, 0) \quad (\text{A-3})$$

assumindo que o óleo residual em dois testemunhos idênticos, um com a presença e outro com ausência de partículas capturadas, tenham o mesmo gradiente de pressão aplicado (Fig.3.1).

A Lei de Darcy modificada para o fluxo de água na presença de óleo residual é dada por:

$$U = \frac{kk_{rw}(s_{or})}{\mu_w} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (\text{A-4})$$

A expressão para o número capilar sem partículas capturadas é obtida de (A-1) e (A-4)

$$N_c = \frac{U \mu_w}{\sigma_{wo}} = \frac{kk_{rw}(s_{or})}{\sigma_{wo}} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (\text{A-5})$$

A deposição de partículas, com concentração σ , resulta em uma redução da permeabilidade $1+\beta\sigma$ vezes, onde β é o coeficiente dano de formação. Vamos então utilizar a mesma expressão para a permeabilidade com injeção de água na presença de óleo residual :

$$U_\sigma = \frac{kk_{rw}(s_{or})}{\mu_w(1+\beta\sigma)} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (\text{A-6})$$

A expressão para o número capilar com partículas depositadas é obtida da Lei de Darcy modificada para o fluxo de água na presença de óleo residual.

$$\frac{U_\sigma \mu_w}{\sigma_{wo}} = \frac{kk_{rw}(s_{or})}{\sigma_{wo}(1+\beta\sigma)} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (\text{A-7})$$

Onde a captura de σ partículas reduz o fluxo de água $1+\beta\sigma$ vezes.

De (A-5) e (A-7) segue a expressão para o número capilar no caso de partículas capturadas.

$$\frac{kk_{rw}(s_{or})}{\sigma_{wo}(1+\beta\sigma)} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{N_c}{1+\beta\sigma} \quad (\text{A-8})$$

Para o caso onde temos testemunhos com o mesmo gradiente de pressão com e sem injeção de partículas, a saturação de óleo residual é a mesma.

$$s_{or} = f(N_c, \sigma) = f(N_c(1+\beta\sigma), 0) \quad (\text{A-9})$$

A quantidade de óleo mobilizado devido à deposição de σ partículas é igual à diferença:

$$S(N_c, 0) - S(N_c, \sigma) = S(N_c, 0) - S(N_c(1+\beta\sigma), 0) \quad (\text{A-10})$$

Apêndice B

Sistema de Equações

O sistema de equações que governa a injeção de água com partículas oleosas e leva em conta a retenção de gotas de óleo e mobilização de óleo residual, consiste do balanço de massa de gotas de óleo em suspensão, gotas de óleo capturadas pelo meio poroso e óleo residual, da equação de cinética de captura de partículas e da Lei de Darcy modificada (levando em conta o depósito de partículas e o óleo residual).

$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{\partial}{\partial t} (\phi(1-s_{or})c + \sigma + \phi s_{or}) + U \frac{\partial c}{\partial x} = 0 & \text{(balanço de massas)} \quad \text{(B-1)} \\ \frac{\partial \sigma}{\partial t} = \lambda'(\sigma)Uc & \text{(cinética de captura)} \quad \text{(B-2)} \\ U = -\frac{k_0 k_{rw}(s_{or})}{\mu_w(1+\beta\sigma)} \frac{\partial p}{\partial x} & \text{(lei de Darcy modificada)} \quad \text{(B-3)} \\ s_{or} = g(N_c(1+\beta\sigma)) & \text{(saturação de óleo residual)} \quad \text{(B-4)} \end{array} \right.$$

Introduzindo os parâmetros adimensionais abaixo:

$$\begin{aligned} x_D &= \frac{x}{L}; & t_D &= \frac{Ut}{\phi L}; & C &= \frac{c}{c^0}; & S &= \frac{\sigma}{\phi c^0}; \\ s &= \frac{s_{or}}{c^0}; & \lambda &= \lambda' L; & P &= \frac{k_0}{\mu_w UL} P \end{aligned} \quad (\text{B-5})$$

Temos as seguintes equações adimensionais :

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t_D} (C(1 - c^0 s(S)) + S + s(S)) + \frac{\partial C}{\partial x_D} &= 0 & (\text{B-6}) \\ \frac{\partial S}{\partial t_D} &= \lambda(S) C & (\text{B-7}) \\ 1 &= -\frac{k_{rw}(s(S))}{1 + \beta c^0 \phi S} \frac{\partial P}{\partial x_D} & (\text{B-8}) \\ s(S) &= \frac{g(N_c(1 + \beta \phi c^0 S))}{c^0} & (\text{B-9}) \end{aligned} \right.$$

As condições iniciais e de contorno, correspondentes à injeção de água contendo uma determinada concentração de partículas de óleo em suspensão, em um reservatório com óleo residual, o qual não contém partículas em suspensão nem partículas retidas, são as seguintes:

$$t_D = 0 : C = S = 0, s = \frac{s_{or}}{c^0} \quad (\text{B-10})$$

$$x_D = 0 : C = 1 \quad (\text{B-11})$$

Apêndice C

Modelo Analítico para Filtração Profunda na Presença de Óleo Residual

A equação (C-1) permite a introdução do potencial:

$$C = \frac{1}{\lambda(S)} \frac{\partial S}{\partial t_D} = \frac{\partial \Phi(S)}{\partial t_D} \quad (\text{C-1})$$

De (C-1) encontramos a expressão para o potencial:

$$\Phi(S) = \int_0^S \frac{dS}{\lambda(S)} \quad (\text{C-2})$$

Substituindo (C-1) na equação do balanço de massa (B-6), obtemos:

$$\frac{\partial}{\partial t_D} \left[\frac{\partial \Phi(S)}{\partial t_D} (1 - c^0 s(S)) + S + s(S) \right] + \frac{\partial}{\partial x_D} \left[\frac{\partial \Phi(S)}{\partial t_D} \right] = 0 \quad (\text{C-3})$$

Mudando a ordem da diferenciação no segundo termo em (C-3) e integrando em t_D , obtemos:

$$\frac{\partial \Phi(S)}{\partial t_D} (1 - c^0 s(S)) + S + s(S) + \frac{\partial \Phi(S)}{\partial x_D} = \text{const} \quad (\text{C-4})$$

A partir da condição inicial (B-10), encontramos a constante do lado direito de (C-4):

$$(1 - c^0 s(S)) \frac{\partial \Phi(S)}{\partial t_D} + S + s(S) + \frac{\partial \Phi(S)}{\partial x_D} = s(0) \quad (\text{C-5})$$

A condição inicial para esta equação diferencial parcial de primeira ordem quase-linear (EDP) é (B-10). E a condição de contorno para a EDP segue da condição de contorno (B-11):

$$x_D = 0 : C = 1, \Phi(S(0, t_D)) = t_D \quad (\text{C-6})$$

$$\Phi(S(0, t_D)) = \int_0^{s(0, t_D)} \frac{dS}{\lambda(S)} = t_D \quad (\text{C-7})$$

De (C-1) e (C-5), temos:

$$(1 - c^0 s(S)) \frac{\partial S}{\partial t_D} + \frac{\partial S}{\partial x_D} = \lambda(S) [s(0) - S - s(S)] \quad (\text{C-8})$$

Apresentamos abaixo a equação (C-8) em sua forma característica usando t_D como parâmetro ao longo da curva característica. Para as equações características começando no eixo $x_D=0$ (Fig. 3-3) temos:

$$\frac{dS}{dt_D} = \frac{\partial S}{\partial t_D} + \frac{dx_D}{dt_D} \frac{\partial S}{\partial x_D} = \frac{\partial S}{\partial t_D} + \frac{1}{(1 - c^0 s(0))} \frac{\partial S}{\partial x_D} = \frac{\lambda(S) [s(0) - S - s(S)]}{(1 - c^0 s(0))}$$

onde,

$$\frac{dx_D}{dt_D} = \frac{1}{1 - c^0 s(S)} \quad (\text{C-9})$$

e

$$\frac{dS}{dt_D} = \lambda(S) \frac{s(0) - S - s(S)}{1 - c^0 s(S)} \quad (\text{C-10})$$

Para a condição inicial $t_D=0$ temos $S=0$. O lado direito de (C-10) é igual a zero para $S=0$. Portanto, S é igual a zero ao longo da curva característica:

$$x_D > \frac{1}{1 - c^0 s(0)} t_D : S = 0 \quad (\text{C-11})$$

Agora, vamos discutir as curvas características começando no eixo $t_D=0$ com x_D como parâmetro ao longo de cada característica (Fig. 3-3).

As relações ao longo dessas características utilizando x_D como parâmetro são:

$$\frac{dS}{dx_D} = \frac{dt_D}{dx_D} \frac{\partial S}{\partial t_D} + \frac{\partial S}{\partial x_D} = (1 - c^0 s(0)) \frac{\partial S}{\partial t_D} + \frac{\partial S}{\partial x_D} = \lambda(S) [s(0) - S - s(S)]$$

onde

$$\frac{dt_D}{dx_D} = (1 - c^0 s(S)) \quad (\text{C-12})$$

e

$$\frac{dS}{dx_D} = \lambda(S) [s(0) - S - s(S)] \quad (\text{C-13})$$

A equação diferencial ordinária (EDO) (C-13) pode ser resolvida pela separação de variáveis:

$$\frac{dS}{\lambda(S) [s(0) - S - s(S)]} = dx_D \quad (\text{C-14})$$

$$x_D = \int_{s(0, t_D)}^s \frac{dS}{\lambda(S) [s(0) - S - s(S)]} \quad (\text{C-15})$$

O valor de $S(0, t_D')$ é determinado pela equação (C-7).

De (C-12) obtemos:

$$dt_D = (1 - c^0 s(S)) dx_D = \frac{(1 - c^0 s(S)) dS}{\lambda(S) [s(0) - S - s(S)]} \quad (C-16)$$

$$t_D - t_D' = \int_{s(0, t_D')}^S \frac{(1 - c^0 s(S)) dS}{\lambda(S) [s(0) - S - s(S)]} \quad (C-17)$$

Substituindo t_D' em (C-17) pela expressão de (C-7), temos:

$$t_D = \int_{s(0, t_D')}^S \frac{(1 - c^0 s(S)) dS}{\lambda(S) [s(0) - S - s(S)]} + \int_0^{s(0, t_D')} \frac{dS}{\lambda(S)} \quad (C-18)$$

Finalmente, a distribuição da deposição de partículas $S(x_D, t_D)$ é dada por duas equações transcendentais (C-15) e (C-18) com duas variáveis desconhecidas $S(x_D, t_D)$ e $S(0, t_D')$. Os valores correspondentes em x_D e t_D podem ser encontrados das equações (C-15) e (C-18), respectivamente.

A distribuição da concentração das partículas em suspensão $C(x_D, t_D)$ é obtida de (C-1).

A deposição de partículas na frente de injeção (frente de onda) é zero e o óleo residual é igual ao valor inicial. Substituindo (B-7) em (B-6), obtemos a relação para a frente de partículas, cuja curva característica é:

$$\frac{dx_D}{dt_D} = \frac{1}{(1 - c^0 s(0))}, \quad G = \frac{s'(0) + 1}{c^0 s'(0)}, \quad s'(0) = \frac{\partial s(S=0)}{\partial S} \quad (C-19)$$

$$\frac{dC}{dt_D} = \lambda(0) c^0 s'(0) \frac{[C - G]C}{(1 - c^0 s(0))}$$

Aplicando a condição inicial (B-10) na última equação de (C-19), obtemos a concentração C ao longo da frente de injeção:

$$x_D = \frac{t_D}{1 - c^0 s(0)}; \Rightarrow C\left(\frac{t_D}{1 - c^0 s(0)}, t_D\right) = G \left\{ 1 - (1 - G) \exp\left[\frac{\lambda(0)[s'(0) + 1]}{1 - c^0 s(0)} t_D\right] \right\}^{-1} \quad (\text{C-20})$$

As fórmulas (C-19,20) são válidas para o intervalo em rampa da Curva de Dessaturação Capilar (CDC), onde $s'(0)$ é negativo e menor que um, e, portanto, $G < 0$. Para $G > 0$, as fórmulas são similares.

Apêndice D

Coefficiente de Filtração Constante

A solução (C-15,18) pode ser expressa de forma implícita para o caso onde o coeficiente de filtração é constante ($\lambda(S) = \lambda_0$). Este caso corresponde à injeção de baixas concentrações de partículas em suspensão, onde a retenção de partículas não altera significativamente a estrutura do meio poroso.

Para a função potencial de fluxo (C-2) temos:

$$\Phi(S(0, t_D)) = \frac{S(0, t_D)}{\lambda} = t_D \quad (\text{D-1})$$

As equações (C-15) e (C-17) tomam a seguinte forma:

$$\lambda x_D = \int_{s(0, t_D)}^S \frac{dS}{s(0) - S - s(S)} \quad (\text{D-2})$$

e

$$\lambda t_D - S(0, t_D) = \int_{s(0, t_D)}^S \frac{(1 - c^0 s(S)) dS}{s(0) - S - s(S)} \quad (\text{D-3})$$

Utilizando a expressão convencional para a curva de dessaturação capilar (LAKE, 1989, CHATZIS e MORROW, 1984, CHATZIS et. al., 1983):

$$s(S) = \frac{1}{c^0} \left(s_{or0} + \frac{s_{or1} - s_{or0}}{1 + MN_c(1 + \beta\phi c^0 S)} \right) \quad (D-4)$$

O denominador do integrando de (D-3) é dado por:

$$s(0) - s(S) - S = S \frac{A - S}{D + S} \quad (D-5)$$

onde:

$$A = \frac{(s_{or1} - s_{or0})}{(1 + MN_c)c^0} - \frac{1 + MN_c}{MN_c\beta\phi c^0} \quad (D-6)$$

6)

e

$$D = \frac{(1 + MN_c)}{MN_c\beta\phi c^0} \quad (D-7)$$

Substituindo (D-5), (D-6) e (D-7) em (D-2) temos:

$$x_D = \frac{D}{\lambda A} \ln \frac{S}{S(0, t'_D)} - \frac{D + A}{\lambda A} \ln \frac{(A - S)}{A - S(0, t'_D)} \quad (D-8)$$

Substituindo (D-1) em (D-3) e usando as expressões (D-4,6,7), obtemos:

$$t_D = \frac{D - s_{or0}B}{\lambda A} \ln \left(\frac{S}{S(0, t'_D)} \right) - \frac{(D + A) - s_{or0}(B + A)}{\lambda A} \left(\ln \left(\frac{A - S}{A - S(0, t'_D)} \right) + \frac{S(0, t'_D)}{\lambda} \right) \quad (D-9)$$

$$\text{onde } B = \frac{s_{or0}MN_c + s_{or1}}{s_{or0}MN_c\beta\phi c^0} \quad (D-10)$$

A diferença de pressão no testemunho durante a injeção é dada por (B-8).

$$\Delta P = \int_0^1 -\frac{\partial P}{\partial x_D} dx_D = \int_0^1 \frac{1 + \beta\phi c^0 S}{k_{rw}(s(S))} dx_D \quad (\text{D-11})$$

onde a permeabilidade relativa é dada por (LAKE, 1989):

$$k_{rw}(s(S)) = k_{rw}(s_{or0}) \left(\frac{1 - c^0 s(S) - s_{wi}}{1 - s_{wi} - s_{or0}} \right)^n \quad (\text{D-12})$$

Apêndice E

Coeficiente de Filtração Linear

A solução (C-15,18) pode ser expressa de forma implícita para o caso onde o coeficiente de filtração é linear. Este caso corresponde, por exemplo, à injeção de água contendo uma concentração de partículas onde estas são retidas nas gargantas dos poros independentemente umas das outras, ou seja, não há interação entre as partículas.

A função de filtração pode ser definida como:

$$\lambda(S) = \lambda_0 \left(1 - \frac{S}{S_m} \right) \quad (\text{E-1})$$

onde λ_0 é o valor inicial do coeficiente de filtração e S_m é o valor máximo adimensional da concentração de partículas depositada no meio poroso.

Se S_m excede os valores típicos da deposição de partículas em um determinado experimento ($S_m \rightarrow \infty$), a função de filtração (E-1) tende assintoticamente para o coeficiente de filtração constante ($\lambda(S) = \lambda_0$ caso do apêndice D).

Introduzindo o potencial de fluxo (C-2) e calculando o seu valor na condição de contorno em $x_D=0$ temos:

$$\Phi(S(0, t'_D)) = t'_D = -\frac{S_m}{\lambda_0} \left(\ln \left(\frac{S_m - S(0, t'_D)}{S_m} \right) \right) \quad (\text{E-2})$$

As equações (C-15) e (C-18) tomam a forma:

$$x_D = \frac{S_m}{\lambda_0} \int_{s(0, t'_D)}^S \frac{dS}{(S_m - S) [s(0) - S - s(S)]} \quad (\text{E-3})$$

e

$$t_D = \frac{S_m}{\lambda_0} \int_{s(0, t'_D)}^S \frac{(1 - c^0 s(S)) dS}{(S_m - S) (s(0) - S - s(S))} - \frac{S_m}{\lambda_0} \left(\ln \left(\frac{S_m - S(0, t'_D)}{S_m} \right) \right) \quad (\text{E-4})$$

Utilizando a expressão para a curva de dessaturação capilar (D-4) na equação (E-3), aplicando as equações (D-5), (D-6), (D-7) e integrando, temos:

$$x_D = \frac{D}{\lambda_0 A} \left(\ln \left(\frac{S}{S(0, t'_D)} \right) \right) + \frac{D + S_m}{\lambda_0 (S_m - A)} \left(\ln \left(\frac{S_m - S}{S_m - S(0, t'_D)} \right) \right) - \frac{S_m}{\lambda_0} \frac{D + A}{A(S_m - A)} \left(\ln \left(\frac{A - S}{A - S(0, t'_D)} \right) \right) \quad (\text{E-5})$$

Substituindo (D-4) em (E-4), usando (D-5), (D-6), (D-7) e (D-10) e integrando, temos:

$$t_D = \frac{D - s_{or0} B}{\lambda_0 A} \left(\ln \left(\frac{S}{S(0, t'_D)} \right) \right) + \frac{(D - s_{or0} B) + S_m (1 - s_{or0})}{\lambda_0 (S_m - A)} \left(\ln \left(\frac{S_m - S}{S_m - S(0, t'_D)} \right) \right) - \frac{S_m [(D - s_{or0} B) + A(1 - s_{or0})]}{\lambda_0 A (S_m - A)} \left(\ln \left(\frac{A - S}{A - S(0, t'_D)} \right) \right) + \frac{S_m}{\lambda_0} \left(\ln \left(\frac{S_m - S(0, t'_D)}{S_m} \right) \right) \quad (\text{E-6})$$

Finalmente, obtemos um sistema de duas equações transcendentais (E-5, E-6) para duas variáveis desconhecidas: S e $S(0, t'_D)$.

A diferença de pressão no testemunho durante a injeção é dada por (B-8).

$$\Delta P = \int_0^1 -\frac{\partial P}{\partial x_D} dx_D = \int_0^1 \frac{1 + \beta \phi c^0 S}{k_{rw}(s(S))} dx_D \quad (\text{E-7})$$

onde a permeabilidade relativa é dada por (D-12).

Apêndice F

Modelo para injeção de emulsão com velocidade inferior à da formação do óleo residual

Apresentamos abaixo o modelo analítico adaptado para as condições de injeção da emulsão em vazão inferior à que gerou o óleo residual. Nestas condições, entre o número capilar de injeção (N_c) e o número capilar da formação do óleo residual (N_{c0}) (Fig. F-1), as partículas da emulsão depositadas no meio poroso não deslocarão óleo e, portanto, o sistema se comportará de acordo com o modelo clássico. A partir do número capilar de formação do óleo residual, o processo de *snap-off* se inicia.

Este modelo adaptado, apresenta, portanto, duas fases distintas:

Fase 1) A injeção de emulsão não desloca óleo residual até uma determinada condição crítica (F-1). Para a modelagem desta parte, utilizaremos o modelo clássico. Nesta fase o óleo residual imóvel, afetará a porosidade do testemunho e a mobilidade da emulsão reduzindo-os (regiões 0, 1 e 2 da Figura 5-2).

$$g\left(N_c\left(1 + \beta\phi c^0 S_{cri}\right)\right) = \frac{S_{or}}{c^0} \quad (\text{F-1})$$

Fase 2) A partir da condição crítica, vale o modelo que leva em conta o deslocamento do óleo residual por *snap-off* (região 3 da Figura 5-2).

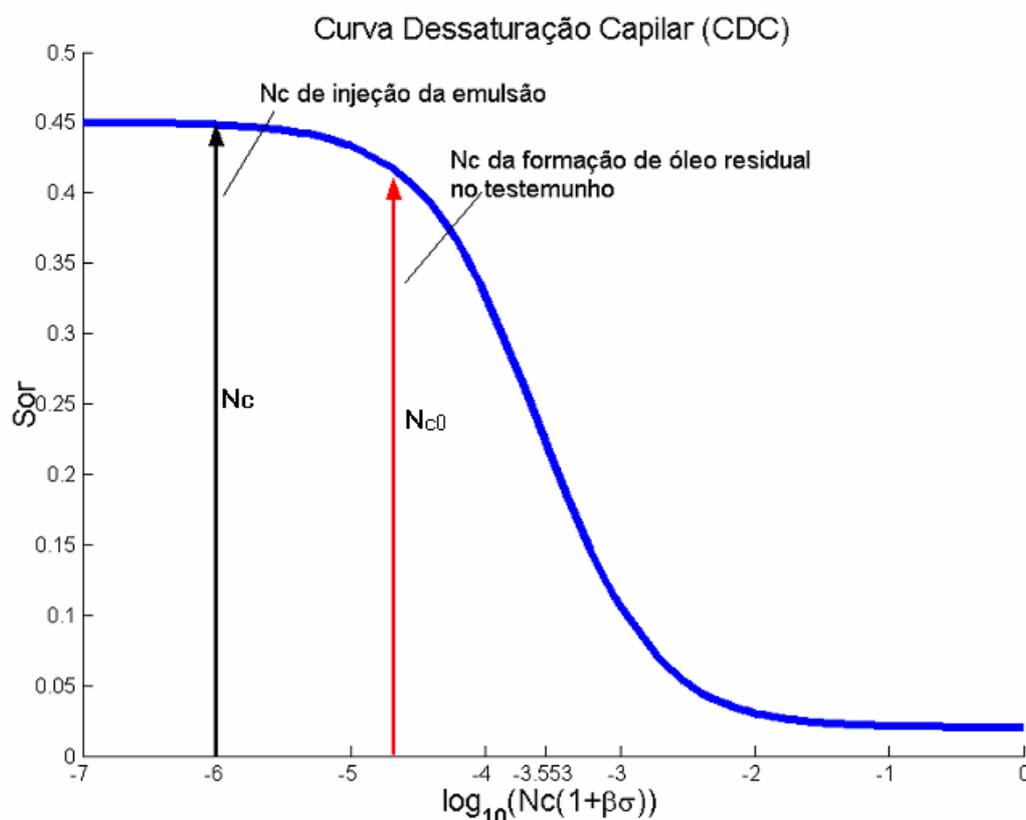


Figura F-1 Curva de dessaturação capilar indicando o atraso na injeção da emulsão

F.1 Solução para a fase 1 – sem deslocamento de óleo (modelo clássico)

Nesta fase, o óleo residual permanece imóvel. Ela é composta por três regiões distintas (Fig. 5-2):

- a) Região 0: à frente da onda de emulsão.
- b) Região 1: onde ocorre a filtração profunda segundo o modelo clássico.
- c) Região 2: região de transição entre o modelo clássico e o modelo com *snap-off*.

As condições iniciais e de contorno correspondentes à injeção de água contendo uma determinada concentração partículas de óleo em suspensão em um reservatório com óleo residual, o qual não contém partículas em suspensão nem partículas retidas são as seguintes:

$$t_D = 0 : C = S = 0, s(0) = \frac{S_{or}}{c^0} = s_i \quad \text{condição inicial} \quad (F-2)$$

$$x_D = 0 : C = 1 \text{ e } g\left(N_c(1 + \beta\phi c^0 S)\right) \leq s(0) \quad \text{condições de contorno} \quad (F-3)$$

Temos as seguintes equações adimensionais :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial t_D} (C(1 - c^0 s_i) + S) + \frac{\partial C}{\partial x_D} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial t_D} = \lambda(S) C \\ 1 = - \frac{k_{rw}(s_i)}{1 + \beta c^0 \phi S} \frac{\partial P}{\partial x_D} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{(F-4)} \\ \text{(F-5)} \\ \text{(F-6)} \end{array}$$

onde $s_i = s(0)$ é o óleo residual inicial (imóvel).

De (F-5) temos:

$$C = \frac{1}{\lambda(S)} \frac{\partial S}{\partial t_D} \quad \text{(F-7)}$$

e, da mesma forma utilizada no apêndice C, introduzindo o potencial

$$\frac{\partial \Phi(S)}{\partial t_D} = \frac{1}{\lambda(S)} \frac{\partial S}{\partial t_D} \quad \text{(F-8)}$$

e aplicando-o em (F-7) em (F-4) mais a condição de inicial (F-2) temos:

$$(1 - c^0 s_i) \frac{\partial \Phi(S)}{\partial t_D} + S + \frac{\partial \Phi(S)}{\partial x_D} = 0 \quad \text{(F-9)}$$

Aplicando (F-8) temos

$$(1 - c^0 s_i) \frac{\partial S}{\partial t_D} + \frac{\partial S}{\partial x_D} = -\lambda(S) S \quad \text{(F-10)}$$

Abaixo temos a equação (F-10) em sua forma característica usando x_D como parâmetro ao longo da curva característica. Para as equações características começando no eixo $t_D=0$ temos para $S(x_D(t_D), t_D)$:

$$\frac{dS(t_D, t_D(x_D))}{dt_D} = \frac{\partial S}{\partial t_D} + \frac{dx_D}{dt_D} \frac{\partial S}{\partial x_D} = \frac{\partial S}{\partial t_D} + \frac{1}{(1 - c^0 s_i)} \frac{\partial S}{\partial x_D} = \frac{-\lambda(S)S}{(1 - c^0 s_i)} \quad (\text{F-11})$$

portanto $\frac{dS}{dt_D} = \frac{-\lambda(S)S}{(1 - c^0 s_i)}$ (F-12)

onde $\frac{dx_D}{dt_D} = \frac{1}{(1 - c^0 s_i)}$

Mas, pela condição inicial, em $t_D=0$ temos $S=0$, portanto, todos os valores de $S(x_D,0)=0$. Portanto, S é igual a zero ao longo da curva característica:

$$x_D > \frac{1}{1 - c^0 s_i} t_D \Rightarrow S = 0$$

Esta solução corresponde à região 0 da Figura F-1.

Solução para a região 1:

Abaixo temos equação (F-10) em sua forma característica usando t_D como parâmetro ao longo da curva característica. Para as equações características começando no eixo $x_D=0$ temos para $S(x_D(t_D), t_D)$:

$$\frac{dS((x_D(t_D), t_D))}{dx_D} = \frac{dt_D}{dx_D} \frac{\partial S}{\partial t_D} + \frac{\partial S}{\partial x_D} = (1 - c^0 s_i) \frac{\partial S}{\partial t_D} + \frac{\partial S}{\partial x_D} = -\lambda(S)S \quad (\text{F-13})$$

portanto, $\frac{dS}{dx_D} = -\lambda(S)S$ (F-14)

onde $\frac{dt_D}{dx_D} = (1 - c^0 s_i)$ (F-15)

$$\int_0^x dx_D = \frac{1}{(1 - c^0 s_i)} \int_{t'}^t dt_D \quad \Rightarrow \quad t'_D = t_D - (1 - c^0 s_i)x_D \quad \text{para} \quad t_D > (1 - c^0 s_i)x_D$$

De F-14 temos:

$$\int_{s(0, t'_D)}^{S(x_D, t_D)} \frac{dS}{\lambda(S)S} = -x_D \quad (\text{F-16})$$

e da condição inicial temos :

$$x_D = 0: C = 1, \Phi(S(0, t'_D)) = t'_D$$

$$\Phi(S(0, t'_D)) = \int_0^{S(0, t'_D)} \frac{dS}{\lambda(S)} = t'_D \quad (\text{F-17})$$

Esta solução (F-16,17) corresponde à região 1 da Figura F-1.

De (F-5) temos o gradiente de pressão :

$$\Delta P = \int_0^1 -\frac{\partial P}{\partial x_D} dx_D = \int_0^1 \frac{1 + \beta \phi c^0 S}{k_{rw}(s_i)} dx_D$$

$$\Delta P = \frac{1}{k_{rw}(s_i)} \left[x_D + \beta \phi c^0 \int_0^1 S(x_D, t_D) dx_D \right] \quad (\text{F-18})$$

A região 2 é a região de transição da fase 1 para a fase 2. Seu sistema de equações é o mesmo da região 1 (F-3;F-4;F-5). Suas condições inicial e de contorno são dadas por:

$$t_D = (1 - c^0 s_i) x_D + t'_{Dcri} \quad \text{condição inicial} \quad (\text{F-19})$$

$$S(x_{Dcri}, t_{Dcri}) = S_{cri} \quad \text{condição de contorno} \quad (\text{F-20})$$

onde S_{cri} é dado pela condição crítica (F-1) e t'_{Dcri} é dado por (F-20) para $x_D=0$.

Pelo método das características temos $S(x_D, t_D(x_D))$ dado por F-11:

$$\frac{dt_D}{dx_D} = (1 - c^0 s_i) \rightarrow x_D - x_{Dcri} = \frac{t_D - t_{Dcri}}{(1 - c^0 s_i)} \quad (\text{F-21})$$

onde o ponto (x_{Dcri}, t_{Dcri}) é dado pela condição crítica com :

$$t_D > (1 - c^0 s_i) x_D + t'_{Dcri}$$

$$e \quad \frac{dS}{dx_D} = -\lambda(S)S \rightarrow \int_{s(x_{Dcri}, t_{Dcri})}^{S(x_D, t_D)} \frac{dS}{\lambda(S)S} = -(x_D - x_{Dcri}) \quad (\text{F-22})$$

Esta solução (F-22) corresponde à região 2 da Figura F-1.

O gradiente de pressão é dado por F-18.

F.2 Solução para a fase 2 – com deslocamento de óleo para $t_d > t_{dcri}$

A partir da condição crítica, o óleo residual será deslocado por *snap-off* (Região 3 da Figura F-1).

Condição inicial

$$t_D = t_{Dcri} : S = S_{cri}, s(S_{cri}) = g\left(N_c (1 + \beta\phi c^0 S_{cri})\right) = s_i; C(x, t_{Dcri}) = C(S_{cri}) \quad (F-23)$$

Condições de contorno

$$x_D = 0 : C = 1 ; \quad (F-24)$$

Temos as seguintes equações adimensionais, considerando que S_{cri} não afeta a porosidade.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial t_D} (C(1 - c^0 s(S)) + S + s(S)) + \frac{\partial C}{\partial x_D} = 0 \quad (F-25) \\ \frac{\partial S}{\partial t_D} = \lambda(S) C \quad (F-26) \\ 1 = -\frac{k_{rw}(s(S))}{1 + \beta c^0 \phi S} \frac{\partial P}{\partial x_D} \quad (F-27) \\ s(S) = \frac{g(N_c (1 + \beta\phi c^0 S))}{c^0} \quad (F-28) \end{array} \right.$$

Este é o mesmo sistema de equações do apêndice B e, portanto, a solução é a mesma apresentada no apêndice C, modificando-se apenas as condições iniciais.

O potencial é dado por:

$$\Phi(S(0, t_D')) = \int_{S_{cri}(0, t_{cri})}^{S(0, t_D')} \frac{dS}{\lambda(S)} = t_D' - t_{cri}' \quad (F-29)$$

E as soluções são dadas por:

$$x_D = \int_{S(0, t_D')}^s \frac{dS}{\lambda(S) [s_i - S - s(S)]} \quad (F-30)$$

e

$$t_D - t'_D = \int_{s(0,t'_D)}^S \frac{(1 - c^0 s(S)) dS}{\lambda(S) [s_i - S - s(S)]} \quad (\text{F-31})$$

F.3 Solução para as fases 1 e 2 para o caso onde a taxa de captura é linear

Considerando sempre $S_{\text{cri}} < S_m$ (condição para haver *snap-off*) com o coeficiente de captura variando linearmente (E-1) e que a curva de saturação de óleo residual é dada por (D-4), temos a seguinte solução para o sistema:

Região 0 da Figura 5-2 : do item 'a' da solução para a fase 1 temos que:

$$x_D > \frac{1}{1 - c^0 s_i} t_D \Rightarrow S = 0 \text{ e } C = 0$$

Região 1 da Figura 5-2 : de (F-12) temos

$$\int_{s(0,t'_D)}^{S(x_D,t_D)} \frac{dS}{\lambda(1 - \frac{S}{S_m})S} = x_D \Rightarrow \ln \left(\left(\frac{S}{S_m - S} \right) \left(\frac{S_m - S'}{S'} \right) \right) = -\lambda x_D$$

$$S = \frac{S_m S' e^{-\lambda x_D}}{S_m - S' (1 - e^{-\lambda x_D})}$$

$$\text{onde } S' = S_m (1 - e^{-\frac{\lambda_0 t'_D}{S_m}}) \Rightarrow S' = S_m (1 - e^{-\frac{\lambda_0 (t_D - (1 - c^0 s_i) x_D)}{S_m}})$$

logo,

$$S = \frac{S_m (1 - e^{-\frac{\lambda_0 (t_D - (1 - c^0 s_i) x_D)}{S_m}})}{1 + e^{-\frac{\lambda_0 (t_D - (1 - c^0 s_i) x_D)}{S_m}} (e^{\lambda x_D} - 1)} \quad (\text{F-32})$$

Aplicando (F-26) em (F-6) que a concentração é dada por:

$$C = \frac{1}{1 + e^{-\frac{\lambda_0 (t_D - (1 - c^0 s_i) x_D)}{S_m}} (e^{\lambda_0 x_D} - 1)} \quad (\text{F-33})$$

Região 2 da Figura 5-2 : de (F-22) temos que,

$$\int_{s(x_{Dcri}, t_{Dcri})}^{S(x_D, t_D)} \frac{dS}{\lambda(S)S} = -(x_D - x_{Dcri}) \rightarrow \ln\left(\left(\frac{S}{S_m - S}\right)\left(\frac{S_m - S_{cri}}{S_{cri}}\right)\right) = -\lambda(x_D - x_{Dcri})$$

logo,

$$S(x_D, t_D) = \frac{S_m S_{cri}}{(S_m - S_{cri})e^{\lambda(x_D - x_{Dcri})} + S_{cri}} \quad (\text{F-34})$$

A concentração é dada por (F-6).

Região 3 da Figura 5-2: de F-29, F-30 e F-31 temos que,

$$t'_D = -\frac{S_m}{\lambda} \ln\left(\frac{S_m - S(0, t'_D)}{S_m}\right) \quad (\text{F-35})$$

ou

$$S(0, t'_D) = S_m (1 - S_m) e^{-\frac{\lambda t'_D}{S_m}} \quad (\text{F-36})$$

onde

$$S_{cri} = (1/(\beta \phi C_o)) * ((N_{c0}/N_c) - 1) \quad (\text{F-37})$$

e

$$t'_{Dcri} = -\frac{S_m}{\lambda} \ln\left(\frac{S_m - S_{cri}}{S_m}\right) \quad (\text{F-38})$$

As equações (F-30) e (F-31) tomam a forma:

$$x_D = \frac{S_m}{\lambda_0} \int_{s(0, t'_D)}^s \frac{dS}{(S_m - S)[s_i - S - s(S)]} \quad (\text{F-39})$$

e

$$t_D = \frac{S_m}{\lambda_0} \int_{s(0, t'_D)}^s \frac{(1 - c^0 s(S)) dS}{(S_m - S)(s_i - S - s(S))} - \frac{S_m}{\lambda} \ln\left(\frac{S_m - S(0, t'_D)}{S_m}\right) \quad (\text{F-40})$$

Utilizando a expressão para a curva de dessaturação capilar (D-4) na equação (F-39), aplicando as equações (D-5), (D-6), (D-7) e integrando, temos:

$$x_D = \frac{S_m}{\lambda_0} \int_{s(0, t'_D)}^s \frac{(D + S) dS}{(S_m - S) \left(\frac{(s_{ori} - S_{or}^h)}{c^0} H + \left(\frac{s_{ori} - S_{or}^h}{c^0} - D \right) S - S^2 \right)} \quad (\text{F-41})$$

onde

$$H = \frac{(1 + MN_c) - \frac{(S_{or}^l - S_{or}^h)}{(S_{ori} - S_{or}^h)}}{MN_c \beta \phi c^0} \quad (F-42)$$

Substituindo (D-4) em (F-40), usando (D-5), (D-6), (D-7) e (D-10) e integrando, temos:

$$\begin{aligned}
 t_D = & \frac{S_m}{\lambda_0} \int_{S(0,t_D)}^S \frac{(D+S)dS}{(S_m - S) \left(\frac{(S_{ori} - S_{or}^h)}{c^0} H + \left(\frac{S_{ori} - S_{or}^h}{c^0} - D \right) S - S^2 \right)} - \\
 & - \frac{S_m S_{or}^h}{\lambda_0'} \int_{S(0,t_D)}^S \frac{(B+S)dS}{(S_m - S) \left(\frac{(S_{ori} - S_{or}^h)}{c^0} H + \left(\frac{S_{ori} - S_{or}^h}{c^0} - D \right) S - S^2 \right)} - \\
 & - \frac{S_m}{\lambda} \ln \left(\frac{S_m - S(0,t_D)}{S_m} \right) \\
 t_D = & x_D - \frac{S_m S_{or}^h}{\lambda_0'} \int_{S(0,t_D)}^S \frac{(B+S)dS}{(S_m - S) \left(\frac{(S_{ori} - S_{or}^h)}{c^0} H + \left(\frac{S_{ori} - S_{or}^h}{c^0} - D \right) S - S^2 \right)} - \\
 & - \frac{S_m}{\lambda} \ln \left(\frac{S_m - S(0,t_D)}{S_m} \right) \quad (F-45)
 \end{aligned}$$

A concentração é dada por (F-6) e o gradiente de pressão é dado por F-18

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)