

**Caracterização do Reboco Externo Durante a Injeção de Água do Mar  
(aplicação para descarte de água produzida no aquífero)**

**Maylton Freitas da Silva**

“Tese 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 de Petróleo”

**Orientador: Pavel Bedrikovetsky, Ph.D, D. Sc**

**Macaé/RJ**

**Dezembro de 2003**

**Caracterização do Reboco Externo Durante a Injeção de Água do Mar  
(aplicação para descarte de água produzida no aquífero)**

**Maylton Freitas da Silva**

Tese 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 de Petróleo.

Aprovada em 19 de dezembro de 2003

Comissão Examinadora:

---

Antonio Luiz S. Souza (Ph.D., Engenharia de Petróleo – CENPES/PETROBRAS)

---

Antonio Abel Gonzáles Carrasquilla (Ph.D , Geofísica – LENEP/CCT/UENF)

---

André Duarte Bueno (Ph.D., Engenharia Mecânica – LENEP/CCT/UENF)

---

Pavel Bedrikovetsky (Ph.D., Engenharia de Petróleo – LENEP/CCT/UENF)  
(orientador)

## Dedicatória

Dedico este trabalho a minha esposa Margareth sem seu apoio esta tese não seria escrita, sua paciência e carinho durante anos de estudo foram os fatores que permitiram que este trabalho fosse concluído.

Minha filhas Nicole e Nadine por terem emprestado o pai durante todo esse tempo a Palas Atena a deusa da sabedoria.

## Agradecimentos

Ao Prof. Pavel, que além de orientador se revelou um verdadeiro mestre e amigo durante este período.

Aos colegas de trabalho e estudo, Netto, Daher, Marcos, Márcia Ida, Gomes, Bampi, Shurobira, Emanuel e Jeferson cujo apoio nas horas difíceis foi fundamental para que este trabalho fosse concluído.

Aos geo-cientistas do CENPES e UN-BC, pelas discussões e apoio técnico, Shecaira, Alexandre, Carmen, Francisca, Adilson e Paulo Marcos em particular ao Antônio Luiz pelo grande número de sugestões apresentadas.

Ao Emerson cuja tese foi muito útil neste estudo principalmente na revisão bibliográfica e na análise teórica.

A PETROBRAS pela cessão de dados sobre o reservatório alvo.

Aos alunos do LENEP, Adolfo, Shirley, Eurico e outros pelas valiosas discussões sobre esta tese.

Aos professores e funcionários do LENEP pelo esforço da construção e manutenção do laboratório e em particular ao Prof. Dias.

A minha família pelo amor, compreensão e carinho.

## Sumário

- $A$  = área,  $L^2$ ,  $m^2$   
 $C$  = concentração de partículas ppm  
 $c_l$  = concentração de partículas líquidas ppm  
 $c_n$  = número de partículas por unidade de volume,  $L^{-3}$ ,  $m^3$   
 $c_t$  = concentração total de partículas (sólidos + líquidos) ppm  
 $c_s$  = concentração de partículas sólidas ppm  
 $dp$  = diâmetro da partícula injetada  $\mu m$   
 $II$  = índice de injetividade,  $L^4 T/M$ ,  $m^3/\text{dia}/\text{kgf}/\text{cm}^2$   
 $II_0$  = índice de injetividade inicial,  $L^4 T/M$ ,  $m^3/\text{dia}/\text{kgf}/\text{cm}^2$   
 $J$  = impedância adimensional  
 $L$  = comprimento da amostra,  $L$ ,  $m$   
 $k(\sigma)$  = função dano de formação  
 $k_0$  = permeabilidade original da amostra antes da injeção,  $L^2$ ,  $m^2$   
 $k_c$  = permeabilidade do reboco,  $L^2$ ,  $m^2$   
 $M$  = inclinação da impedância antes do  $T_{tr}$   
 $m_n$  = inclinação da impedância antes do  $T_{tr}$  para o sub-amostra  $n$   
 $m_c$  = inclinação da impedância após o  $T_{tr}$  formação do reboco  
 $Q(t)$  = vazão de líquido em função do tempo,  $L^3/T$ ,  $m^3/s$   
 $Q_0$  = vazão de líquido inicial,  $L^3/T$ ,  $m^3/s$   
 $P$  = pressão,  $m/Lt^2$ ,  $Pa$   
 $P$  = razão entre o raio da partícula e o raio do poro multiplicada pela concentração, ppm.  
 $r_l$  = raio da partícula líquida,  $L$ ,  $\mu m$   
 $r_s$  = raio da partícula sólida,  $L$ ,  $\mu m$   
 $r_p$  = raio do poro,  $L$ ,  $\mu m$   
 $T$  = tempo,  $T$ ,  $s$   
 $T$  = tempo adimensional em volumes porosos,  $m^3/m^3$   
 $T_n$  = tempo adimensional em volumes porosos para o seção da amostra  $m^3/m^3$   
 $T_{tr}$  = tempo de transição em volumes porosos  $m^3/m^3$   
 $U$  = velocidade de fluxo de Darcy,  $L/t$ ,  $m/s$   
 $V$  = velocidade de fluxo,  $L/t$ ,  $m/s$   
 $VPI$  = volume poroso injetado adimensional  
 $X$  = distancia linear,  $L$ ,  $m$   
 $X$  = comprimento adimensional  $m/m$   
 $\alpha$  = fração de porosidade critica  
 $\alpha(t)$  = declínio adimensional de vazão no tempo  
 $\beta$  = coeficiente de dano a formação  
 $\phi$  = porosidade  
 $\phi_0$  = porosidade inicial da amostra  
 $\phi_c$  = porosidade do reboco  
 $\lambda$  = coeficiente de filtração,  $L^{-1}$ ,  $m^{-1}$   
 $\lambda_0$  = coeficiente de filtração inicial,  $L^{-1}$ ,  $m^{-1}$   
 $\mu$  = viscosidade,  $m/Lt$ ,  $Pa*s$

$\rho$  = razão entre o raio da partícula e o raio do poro  
 $\rho$  = massa específica,  $M/L^3$ ,  $kg/m^3$   
 $\sigma$  = massa de partículas depositadas por volume  $M/L^3$   $kg/m^3$   
 $\omega$  = fração do comprimento da amostra em um ponto intermediário  
 $\Sigma$  = raio da partícula injetada vezes a concentração  $\mu m \cdot ppm$   
 $\Omega$  = raio do poro  $\mu m$

## Resumo

Grande parte da produção mundial de petróleo e gás vem hoje de plataformas continentais, incluindo as Bacias Marginais Atlânticas da costa brasileira.

Na Bacia de Campos localizada ao leste do estado do Rio de Janeiro está previsto um aumento do uso do método de injeção de água do mar para recuperação secundária, com o conseqüente incremento da água produzida.

De maneira geral a água produzida em campos marítimos após algum tratamento é descartada no mar, sendo eventualmente reinjetada para manutenção da pressão do reservatório. Em antigos reservatórios produtores ou em reservatórios mais rasos também é possível injetar a água produzida com o objetivo apenas de descarte.

A principal limitação para injeção de descarte são as perdas de injetividade causadas pela injeção de partículas sólidas, líquidas ou sua combinação no reservatório.

Um grande número de estudos sobre os efeitos da presença de óleo na água injetada foi realizado nos últimos anos, tendo ocorrido um grande esforço do LENEP (Laboratório de Engenharia e Exploração de Petróleo) e da PETROBRAS (Petróleo Brasileiro S.A.) para determinar e quantificar os mecanismos da perda de injetividade.

A injeção para descarte em reservatórios rasos com comunicação com o fundo oceânico apresenta vantagens, como a impossibilidade de pressurização em função da comunicação com o mar, mas também apresenta riscos potenciais, como a possibilidade de surgência de óleo no fundo do mar, dependendo da proximidade entre o injetor e o afloramento e do tempo de injeção.

O objetivo desta tese é determinar a possibilidade de aproveitamento de reservatórios rasos, conectados com o mar, para descarte de água produzida. Em particular do Arenito São Tomé, reservatório raso da Formação Emborê na Bacia de Campos.

## Abstract

Today, great part of the world production of petroleum and gas comes from off-shore fields. The main Brazilian fields are located in the Atlantic Marginal Basins.

In Campos Basin a great increase of sea water injection is expected for waterflooding recovery, should also happen an increment of the production of water in the next few decades.

In a general way, the water produced from off-shore fields is discarded in the sea after some treatment, being eventually re-injected for pressure maintenance. It is also possible to inject the produced water just for discharge proposals, in old producing reservoirs or in shallow formations.

The main limitation for the re-injection and the injection for discharge proposal is the injectivity loss caused by the injection of solid or liquid particles, or their combination in the reservoir.

A great number of studies on the effects of the oily particles in the injected water were accomplished in the last years. In Brazil there has been a great effort of LENEP (Laboratory of Engineering and Exploration of Petroleum) and of PETROBRAS (Petroleum Brazilian S.A.) to determine and quantify the mechanisms of the injectivity loss.

The water disposal in shallow reservoirs which outcrops in the sea bed presents the advantage of the impossibility of pressure increase due to the communication with the sea, but has the potential risk of the possibility of oil appearance in sea bed, depending on the distance between the injector and the contact point with the sea and the time of injection.

The final goal of this thesis is determining the possibility of use shallow reservoirs connected with the sea for produced water disposal, particularly for São Tomé sandstone, located in Emborê formation in Campos Basin.



## Índice

DEDICATÓRIA.....	III
AGRADECIMENTOS.....	IV
SUMARIO.....	V
RESUMO	VII
ABSTRACT.....	.VIII
INDICE.....	...IX
INDICE DE FIGURAS.....	.XII
INDICE DE TABELAS.....	.XV
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>6</b>
2.1 Dano à Formação.....	6
2.2 Modelos de Perda de Injetividade .....	9
2.3 Revisão dos Modelos de Perda de Injetividade. ....	11
2.4 Discussão Sobre a Modelagem Numérica .....	18
2.5 Abordagem Adotada .....	19
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>20</b>
3.1 Sobre o Modelo Experimental .....	20
3.2 Metodologia Para Determinação das Permeabilidades e Impedâncias... ..	21
3.3 Método dos 3 pontos.....	25
<b>4 ANÁLISE DE TESTES REALIZADOS .....</b>	<b>32</b>

<b>4.1</b>	<b>Testes com injeção de partículas sólidas</b> .....	<b>32</b>
4.1.1	Análise dos parâmetros.....	33
4.1.1.1	Coeficiente de filtração ( $\lambda$ ).....	34
4.1.1.2	Coeficiente de dano à formação $\beta$ .....	37
4.1.1.3	Permeabilidade do Reboco $k_c$ .....	38
4.1.1.4	Fração da Porosidade Crítica ( $\alpha$ ).....	40
<b>4.2</b>	<b>Testes com partículas líquidas</b> .....	<b>44</b>
4.2.1.1	Análise de parâmetros.....	46
<b>4.3</b>	<b>Testes com Partículas Sólidas e Líquidas</b> .....	<b>49</b>
4.3.1.1	Coeficiente de Filtração ( $\lambda$ ).....	50
4.3.1.2	Coeficiente de Dano à Formação ( $\beta$ ).....	52
4.3.1.3	Permeabilidade do Reboco ( $k_c$ ).....	54
4.3.1.4	Volume relativo depositado, $\alpha$ .....	56
<b>4.4</b>	<b>Conclusões Sobre os Testes</b> .....	<b>58</b>
<b>5</b>	<b>REVISÃO DO MODELO PARA OS TESTES COM PARTÍCULAS SÓLIDAS E LÍQUIDAS</b> .....	<b>60</b>
<b>5.1</b>	<b>Metodologia</b> .....	<b>61</b>
<b>5.2</b>	<b>Análise dos Parâmetros</b> .....	<b>62</b>
5.2.1	Coeficiente de Filtração.....	62
5.2.2	Coeficiente de Dano à Formação.....	65
5.2.3	Permeabilidade do Reboco ( $k_c$ ).....	68
5.2.4	Volume Relativo Depositado.....	70
<b>5.3</b>	<b>Resultados da Revisão do Modelo</b> .....	<b>71</b>
<b>6</b>	<b>CÁLCULO DOS PARÂMETROS</b> .....	<b>74</b>
<b>6.1</b>	<b>Injeção de Partículas Sólidas</b> .....	<b>75</b>
<b>6.2</b>	<b>Injeção de Partículas Líquidas</b> .....	<b>77</b>
<b>6.3</b>	<b>Injeção de Partículas Sólidas e Líquidas</b> .....	<b>79</b>
<b>6.4</b>	<b>Resumo Sobre as Correlações</b> .....	<b>83</b>
<b>7</b>	<b>ANÁLISE DO ARENITO SÃO TOMÉ</b> .....	<b>85</b>
<b>7.1</b>	<b>Motivação do Uso do Arenito São Tomé</b> .....	<b>86</b>
<b>7.2</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>87</b>
<b>7.3</b>	<b>Simulações para o Arenito São Tomé</b> .....	<b>88</b>
7.3.1	Efeitos da Concentração de Líquidos.....	89
7.3.2	Efeitos da Concentração de Sólidos.....	91

7.3.3	Efeitos do Diâmetro das Partículas Líquidas.....	92
7.3.4	Efeitos do Diâmetro das Partículas Sólidas.....	92
7.4	<b>Análise de Surgência .....</b>	<b>93</b>
7.5	<b>Cálculo do Número de Poços.....</b>	<b>97</b>
7.6	<b>Resumo dos Resultados.....</b>	<b>100</b>
8	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>101</b>
9	<b>RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>104</b>
10	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>105</b>
11	<b>APÊNDICE A. MODELO LINEAR PARA FILTRAÇÃO PROFUNDA.....</b>	<b>110</b>
12	<b>APÊNDICE B. TEMPO DE TRANSIÇÃO .....</b>	<b>113</b>
13	<b>APÊNDICE C. MODELO LINEAR PARA FORMAÇÃO REBOCO.....</b>	<b>114</b>
14	<b>APÊNDICE D CÁLCULOS FEITOS EM PLANILHA ELETRÔNICA. ....</b>	<b>116</b>
15	<b>APÊNDICE E DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO 4.13 .....</b>	<b>120</b>
16	<b>APÊNDICE F. TABELAS DE RESULTADOS .....</b>	<b>121</b>
17	<b>APÊNDICE G. TESTE DE CORRELAÇÕES PARA OS PARÂMETROS .</b>	<b>129</b>

## Índice de Figuras

Figura 1: Formação de Reboco no meio poroso. ....	7
Figura 2: Exemplo da formação de dano profundo.....	8
Figura 3: Formação de pontes de partículas.....	8
Figura 4: Gráfico de perda de injetividade por vários mecanismos.....	9
Figura 5: Curva tipo 1, forma linear. ....	13
Figura 6 Curva tipo 2: Formação do reboco interno ou externo. ....	14
Figura 7 Curva tipo 3: Representado a filtração profunda.....	15
Figura 8: Curva tipo 4 curva S.....	15
Figura 9, Esboço do equipamento utilizado. ....	20
Figura 10: Resultado do teste 4.9 para a injeção de partículas sólidas. ....	22
Figura 11: Resultado do teste 4.9 recalculado. ....	23
Figura 12: Impedância relativa do Teste 4.9.....	24
Figura 13: Impedância ajustada para os volumes porosos injetados em cada parte da amostra.....	25
Figura 14: Representação esquemática do método dos três pontos.....	26
Figura 15: Exemplo de solução no gráfico de impedância para o tempo de transição para o teste 4.9 (partículas sólidas). ....	27
Figura 16: Exemplo de solução para $\lambda$ e $\beta$ obtido a partir da equação 3.14 para o teste 4.9 (partículas sólidas). ....	27
Figura 17: Exemplo de solução no gráfico de impedância para o tempo de trânsito para o teste 5.7 (partículas sólidas). ....	28
Figura 18: Exemplo de solução para $\lambda$ e $\beta$ obtido a partir da equação 3.14 para o teste 5.7 (partículas sólidas). ....	28
Figura 19: Exemplo de solução no gráfico de impedância para o teste 5.25 (partículas líquidas). ....	28
Figura 20: Exemplo de solução para $\lambda$ e $\beta$ obtido a partir da equação 3.14 para o teste 5.25 (partículas líquidas). ....	29
Figura 21: Exemplo de solução no gráfico de impedância para o tempo de trânsito para o teste 4.17 (partículas sólidas e líquidas). ....	29
Figura 22: Exemplo de solução para $\lambda$ e $\beta$ obtido a partir da equação 3.14 para o teste 4.17 (partículas sólidas e líquidas). ....	30
Figura 23: Exemplo de solução no gráfico de impedância para o tempo de transição para o teste 5.34 (partículas sólidas e líquidas). ....	30
Figura 24 Exemplo de solução para $\lambda$ e $\beta$ obtido a partir da equação 3.14 para o teste 5,34 (partículas sólidas e líquidas) ....	31
Figura 25: $\lambda$ x $\rho$ para os testes com injeção de sólidos apenas. ....	34
Figura 26: $\lambda$ x $\rho$ para os testes com injeção de sólidos apenas, somente os testes com $T_{tr}$ determinado. ....	35
Figura 27: $\lambda$ x $P$ para os testes com injeção de sólidos. ....	36
Figura 28: $\lambda$ x $P$ para os testes com injeção de sólidos, somente os testes com $T_{tr}$ determinado. ....	36
Figura 29: $\beta$ e $\rho$ , para sólidos todos os testes. ....	37
Figura 30: $\beta$ e $P$ , para sólidos todos os testes que atingiram o $T_{tr}$ . ....	38
Figura 31: $K_c$ e $\rho$ , para sólidos todos os testes que atingiram o $T_{tr}$ ( $\phi_c=12\%$ ). ....	39

Figura 32: $K_c$ e $\rho$ , para sólidos todos os testes que atingiram o $T_{tr}$ ( $\phi_c=25\%$ ). .....	39
Figura 33: $\alpha$ e $\rho$ , para sólidos os testes de todos os grupos. ....	41
Figura 34: $\alpha$ e $\rho$ , para sólidos os testes de todos os grupos, apenas testes que atingiram $T_{tr}$ . ....	42
Figura 35: $\alpha$ e $\beta$ , para sólidos os testes de todos os grupos ajuste com uma curva de potência. ....	42
Figura 36: Comparação das soluções pelo método dos 3 pontos e pelo sistema de equações 4.5, 4.6 e 4.7. ....	44
Figura 37: $\lambda$ contra $\rho$ , para líquidos. ....	46
Figura 38: $\lambda$ contra $P$ , para líquidos. ....	47
Figura 39: $\beta$ contra $\rho$ , para líquidos. ....	47
Figura 40: $\beta$ contra $P$ , para líquidos. ....	48
Figura 41: $\alpha$ contra $\rho$ , para líquidos. ....	49
Figura 42: $\lambda$ contra $\rho$ , para líquidos e sólidos (todos os testes, exceto D.3 e 5.30/33/35). ....	51
Figura 43: $\lambda$ contra $P$ , para líquidos e sólidos (todos os testes, exceto D.3 e 5.30/33/35). ....	51
Figura 44: $\beta$ contra $\rho$ , para líquidos e sólidos (todos os testes, sem os testes D.3 e 5.33). ....	52
Figura 45: $k_c$ e $\rho$ , para sólidos e líquidos (todos os testes que atingiram o $T_{tr}$ ( $\phi_c=12\%$ )). ....	55
Figura 46: $k_c$ e $\rho$ , para sólidos e líquidos (todos os testes que atingiram o $T_{tr}$ , excluídos D.3 e 5.35 ( $\phi_c=12\%$ )). ....	56
Figura 47: $\alpha$ e $\rho$ , para sólidos e líquidos todos os testes .....	56
Figura 48: $\alpha$ e $\rho$ , para sólidos e líquidos (todos os testes, excluídos D.3 e 5.30/33/35). ....	57
Figura 49: Correlação entre $\beta$ e $\alpha$ sem os testes extremos. ....	58
Figura 50: $\lambda$ em função de $\rho$ , para sólidos e líquidos (todos os testes). ....	63
Figura 51: $\lambda$ em função de $P$ , para sólidos e líquidos ( todos os testes). ....	63
Figura 52: $\beta$ em função de $\rho$ , para sólidos e líquidos (todos os testes menos o teste 5.31 e 5.35). ....	65
Figura 53: $\beta$ em função de $\alpha$ , para sólidos + líquidos, Todos os testes menos o teste 5.31 e 5.35. ....	66
Figura 54: $k_c$ em função de $\rho$ , para sólidos e líquidos, para todos os testes que atingiram o $T_{tr}$ . ....	68
Figura 55: $\alpha$ em função de $\rho$ , para sólidos e líquidos, todos os testes que atingiram o $T_{tr}$ . ....	70
Figura 56: $k$ em função de $VPI$ , simulação para o teste 4.08 para sólidos. ....	72
Figura 57: $\beta$ em função de $\alpha$ , comparação da análise considerando partículas sólidas e líquidas e só partículas sólidas. ....	73
Figura 58: Ajuste da permeabilidade do teste 5.7 para os dois métodos de partículas sólidas para um $\phi_c$ de 25%. ....	75
Figura 59: Ajuste da impedância do teste 5.7 para os dois métodos de partículas sólidas $\phi_c$ de 25%. ....	76
Figura 60: Ajuste da permeabilidade do teste 5.7 para os dois métodos de partículas sólidas para um $\phi_c$ de 60%. ....	77
Figura 61: Ajuste da permeabilidade do teste 5.19. ....	78

Figura 62: Ajuste da impedância do teste 5.19.....	78
Figura 63: Ajuste de permeabilidade do teste 4.18.....	81
Figura 64: Ajuste de permeabilidade do teste D.2.....	82
Figura 65: Ajuste de permeabilidade do teste 4.19.....	82
Figura 66: Ajuste de impedância do teste 4.19.....	83
Figura 67: Simulação para a permeabilidade de um reservatório (K= 200md, $\phi=$ 24%, $\phi_c=25%$ , $D_s= 5m\mu$ , $D_l= 10m\mu$ , $c_s= 5$ ppm, $c_l= 20$ ppm).....	84
Figura 68 Mapa da Base do Arenito São Tomé. ....	85
Figura 69 Seção Oeste-Leste .....	86
Figura 70: Simulação da perda de injetividade de amostras do Arenito São Tomé.	89
Figura 71: Variação de permeabilidade em função do TOG. ....	90
Figura 72: Variação de permeabilidade em função da concentração de sólidos.....	91
Figura 73: Variação de permeabilidade em função do diâmetro da gota de óleo. ...	92
Figura 74: Variação de permeabilidade em função do diâmetro da partícula sólida. .....	93
Figura 75: Distribuição Acumulada de $\lambda$ para partículas sólidas (Log-normal).....	94
Figura 76: Distribuição de $\lambda$ para partículas sólidas (Log-normal). ....	94
Figura 77 Distribuição Acumulada de $\lambda$ para partículas Líquidas (Log-normal). ....	94
Figura 78 Distribuição de $\lambda$ para partículas líquidas (Log-normal).....	95
Figura 79: Diagrama do possível fluxo em reservatório.....	96
Figura 80: Concentração de saída em função de $\lambda$ e $x$ .....	96
Figura 81: Distribuição de probabilidade para $\beta$ , partículas sólidas.....	98
Figura 82: Distribuição de probabilidade para $\beta$ , partículas líquidas. ....	99
Figura 83: Perda de injetividade calculada para um poço injetor proposto no Ar. São Tomé.....	99

## Índice de Tabelas

Tabela 1 Estimativa de $\beta$ para misturas. ....	54
Tabela 2 Dados dos testes com partículas sólidas e misturas de partículas, variáveis $\rho$ e $P$ . ....	62
Tabela 3 Comparação de valores de $\lambda$ obtidos pelos dois métodos de cálculo. ....	64
Tabela 4 Comparação de valores de $\beta$ obtidos pelos dois métodos de cálculo. ....	67
Tabela 5: Estimativa para $\beta$ para injeção de misturas. ....	68
Tabela 6 Comparação de valores de $k_c$ obtidos pelos dois métodos de cálculo. ....	69
Tabela 7 Comparação de valores de $\alpha$ obtidos pelos dois métodos de cálculo. ....	70
Tabela 8 Resumo dos métodos estimativa de perda de injetividade. ....	80

## 1 Introdução

Nos últimos trinta anos, grande parte da produção mundial de petróleo e gás não pertencente à OPEP (Organização dos Países Exportadores de Petróleo) passou a vir da plataforma continental, principalmente do Mar do Norte, Golfo do México, Costa Ocidental da África e das Bacias Marginais Brasileiras. Além destas áreas, também a região da Ásia Central na área do Mar Cáspio, a costa do Pacífico da antiga União Soviética e o Sudoeste do Pacífico da Grande Barreira de Corais até Timor também têm recebido um aumento de investimentos para a exploração e produção de petróleo.

Em todos estes casos a exploração de petróleo e gás tem envolvido a construção de grandes estruturas, fixas ou flutuantes. Verdadeiras ilhas artificiais que, apesar do seu tamanho, são limitadas técnica e economicamente em relação ao número de equipamentos que podem ser instalados. Devido a estas limitações, centenas de árvores de natal submarinas, milhares de quilômetros de oleodutos, gasodutos, linhas de produção flexíveis além de cabos hidráulicos e eletroeletrônicos têm sido instalados no fundo dos oceanos.

Toda esta infra-estrutura tem como objetivo a produção de hidrocarbonetos. Mas apesar da crescente sofisticação das instalações e dos mecanismos de controle, o grande número de instalações e sua complexidade aumentam o risco de vazamentos de óleo, que provocam danos ao meio ambiente.

Paralelamente ocorreu durante este período um aumento das restrições ambientais em todo o mundo (Ukpohor, 2001), em particular em relação a vazamentos de óleo e o descarte de água oleosa ou salina em mar aberto. Esta restrição tem causado um aumento de equipamentos a bordo das plataformas com o conseqüente aumento de custos. É previsível que nas próximas décadas os órgãos de meio ambiente, tendam a reduzir ainda mais os teores e volumes de óleo que possam ser lançados ao mar, chegando a proibição total do descarte de água com resíduos oleosos e outros produtos pela indústria de petróleo.

Simultaneamente a esse processo de restrição ambiental ocorre o aumento do volume de água produzida em instalações marítimas, pois o uso de injeção de água do mar é o método mais empregado como mecanismo de aumento de produção e recuperação nestes projetos.



Assim o cenário previsto para o futuro próximo combina volumes crescentes de água produzida com o aumento da restrição ambiental. Como exemplo a recente iniciativa da Comissão Europeia que estuda a total proibição de descarte de água produzida no mar para o ano de 2020 (Garland and Hjelde, 2003) ou posições ainda mais duras como da Noruega que pretende atingir o descarte zero ainda em 2005 (Marthinsem and Sørgård, 2002, International Association of Oil & Gas Producers, 2000).

Estas restrições deverão resultar num aumento do custo de produção e conseqüente redução de reservas economicamente explotáveis (Castro et al, 1998).

Em função disso, existe a necessidade de se desenvolver novas técnicas de gerenciamento de água para permitir a produção de óleo e gás com crescentes volumes de água produzida.

Atualmente estudos são desenvolvidos em centros de pesquisas governamentais, universidades e companhias de exploração de petróleo para reduzir o tamanho das plataformas, eliminar a necessidade de grandes plantas de tratamento de água e criar novas formas de dispor da água produzida.

Tradicionalmente a água produzida em campos marítimos é descartada após tratamento no mar, sendo, eventualmente, reinjetada para manutenção de pressão. Nos últimos anos, grandes operadoras como a BP (British Petroleum) e a EXXON (Exxon Mobil Corporation) têm injetado a água produzida apenas com o objetivo de descarte em antigos reservatórios produtores ou em reservatórios mais rasos. Os motivos de tal atitude são ambientais e econômicos. Os primeiros são a antecipação da mudança das normas de descarte evitando a pressão dos agentes reguladores, da mídia e de ONGs (Organizações não governamentais) de meio ambiente, tendo como subproduto passar ao público a imagem de uma companhia “verde”, preocupada com o meio ambiente, uma necessidade atual principalmente nos chamados países desenvolvidos. Quanto à parte econômica o tratamento para descarte ou reinjeção é mais barato e menos complexo que o tratamento para o descarte no mar, reduzindo os custos de operação.

Na Bacia de Campos, onde não se faz descarte de água em reservatórios está previsto um aumento de injeção de água do mar para recuperação secundária e com conseqüente incremento da produção de água nas próximas décadas. Entretanto existe apenas um projeto de reinjeção de água produzida.

O motivo para ausência de projetos de descarte de água nos reservatórios existentes é que para um antigo campo produtor deve-se levar em conta os seguintes fatores:

- 1 - Grande volume de óleo ou gás produzido e conseqüente baixa pressão de reservatório.
- 2 - Ausência de mecanismo de manutenção de pressão.
- 3 – Permeabilidade alta, da ordem de 1 D.
- 4 - Grande espessura de reservatório e grande volume poroso total.
- 5 – O campo deve ter baixa possibilidade de reaproveitamento comercial.
- 6 - Sistemas de produção ou injeção em bom estado de conservação, que garantam uma injeção segura sem possibilidades de vazamentos ou acidentes.
- 7 - Compatibilidade entre a água reinjetada e a água do reservatório.

O atual conjunto de campos da Bacia de Campos não apresenta um candidato com estas características, uma vez que os campos maiores ainda apresentam uma longa vida produtiva e os campos em fim de vida útil são pequenos e seriam rapidamente repressurizados pela injeção. De modo que a futura produção de água terá que ser tratada para descarte no mar, reinjetada para fins de recuperação ou injetada em um reservatório não produtor.

Outro problema para injeção de água seja ela do mar ou produzida, tendo o objetivo de manutenção de pressão ou apenas descarte é a perda de injetividade. As perdas de injetividade são causadas pela injeção de partículas sólidas, líquidas ou sua combinação no reservatório.

Parte significativa da perda de injetividade ocorre com a injeção de hidrocarbonetos na formação, na forma de gotas de óleo, emulsões ou partículas semi-sólidas contendo parafinas ou asfaltenos.

Há um grande número de estudos sobre os efeitos da presença de óleo na água injetada foram realizados nos últimos anos no exterior (Russell and Hazlett, 1996, Okandan et al, 2000 e Ria et al, 2002), também o LENEP e a PETROBRAS tem realizado estudos para determinar os mecanismos da perda de injetividade e quantificar os valores desta perda (Bedrikovetsky et al, 2000, Bedrikovetsky et al, 2001a, Bedrikovetsky, et al, 2001b, Bedrikovetsky et al, 2002).

Nesta tese está sendo proposta a injeção de água produzida para descarte em reservatórios com comunicação com o fundo oceânico, em particular do Arenito São Tomé, da Formação Emborê na Bacia de Campos.

A Injeção de descarte em reservatórios rasos com comunicação com o fundo oceânico apresenta as seguintes vantagens:

1. Impossibilidade de pressurização em função da comunicação com o mar. Neste tipo de reservatório a pressão estática se mantém constante facilitando a injeção de água produzida.

2. Baixa pressão relativa de injeção, da ordem de  $100 \text{ kgf/cm}^2$ , permitindo a instalação de bombas menores, (inclusive no fundo do mar) ou internas (em poços satélites).

No caso das Bacias Marginais Brasileiras ocorrem grandes volumes “in place” de arenitos inconsolidados, da parte continental (linha da costa) até o final da plataforma continental (talude) (Almeida Jr. et al, 2000).

Estes reservatórios também apresentam desvantagens:

1. Apesar de altas permeabilidades os arenitos são intercalados com pacotes que contém argilas e carbonatos, que podem reduzir a permeabilidade para valores menores que 100 mD.

2. Existe a possibilidade de surgência de óleo no fundo do mar, dependendo da proximidade entre o injetor e o ponto de contato com o mar e do tempo de injeção.

Como o reservatório alvo não é portador de hidrocarbonetos foram coletadas poucas informações, não existem testemunhos ou perfis de imagem e não foram coletadas amostras de calha de tamanho suficiente para permitir a realização de testes de fluxo em meio poroso. Para contornar essa falta de informações será utilizado um grande número de testes de fluxo em meio poroso de reservatórios similares efetuados por outros autores para analisarmos o comportamento do reservatório à injeção de partículas sólidas, líquidas e misturas.

A partir destes dados criam-se correlações que permitam simular o fluxo de partículas no Arenito São Tomé, verificando os limites para injeção de partículas sólidas e líquidas suportados pelo reservatório, sem que haja uma perda de injetividade com pequeno volume injetado.

Os resultados das simulações permitirão definir se o reservatório alvo poderá ou não ser utilizado para injeção de descarte de água produzida, eliminando a necessidade da perfuração para obtenção de um testemunho deste reservatório.

## 2 Revisão Bibliográfica

Apresenta-se nesta seção a revisão bibliográfica realizada para verificação do estado da arte sobre perda de injetividade causada por partículas.

### 2.1 *Dano à Formação*

Durante a injeção de água a permeabilidade da formação tende a cair com o tempo, essa redução é chamada dano à formação. O dano à formação é principalmente função do entupimento do meio poroso pelas partículas contidas na água injetada.

A redução de permeabilidade será função inversa da qualidade da água injetada, além de partículas sólidas e gotas de óleo presentes na água injetada alguns outros fatores afetam a qualidade da água de injeção como o crescimento bacteriano e a distribuição dos raios dos poros do reservatório (Milazez e Daher (2000)).

Também podem causar dano à formação partículas finas constituintes naturais da própria rocha ou formadas pela sua dissolução que podem migrar pelo meio poroso e ficarem retidas nas gargantas dos poros, da mesma forma que partículas presentes na água injetada.

A mistura de duas águas distintas (água produzida e água de formação) pode formar uma solução com características muito diferentes das duas primeiras, podendo ocorrer desequilíbrio iônico. A incompatibilidade das águas pode levar à formação de produtos insolúveis como o Sulfato de Bário, que também se precipitam provocando dano à formação.

A presença de bactérias nos equipamentos de superfície e tubulações pode causar problemas, pois caso sejam arrastadas para o reservatório se comportam como partículas causando o entupimento total ou parcial das gargantas de poros. Além disto, as bactérias são uns dos principais responsáveis pela corrosão nos sistemas de injeção. A corrosão também gera partículas sólidas.

A água produzida pode conter então óleo, partículas sólidas e uma variedade de resíduos que podem causar a perda de injetividade. De acordo com Barkmam e Davidson (1972) quatro mecanismos são os causadores do dano de formação:

1. Formação de reboco externo.
2. Dano por invasão profunda.
3. Dano por plugueamento.
4. Fechamento de canhoneados.

Os três primeiros podem ocorrer juntos ou individualmente, em função dos tamanhos das partículas e dos poros. Se as partículas são grandes em relação aos poros ocorre a formação do reboco, que é o agrupamento de partículas na face da rocha (figura 1), o reboco externo possui permeabilidade menor que a da rocha e tem impacto na injetividade.

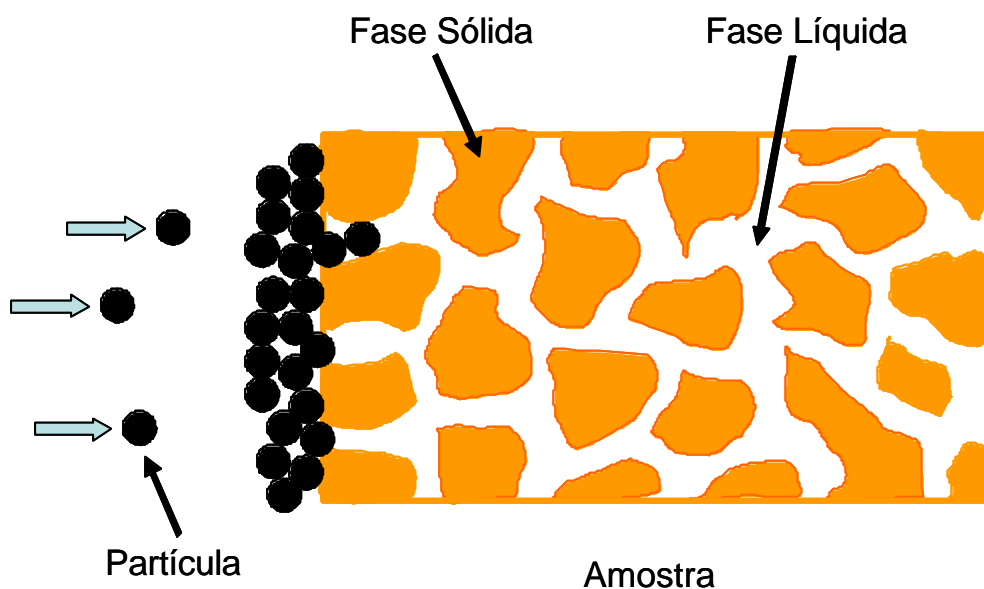


Figura 1: Formação de Reboco no meio poroso.

Quando as partículas são pequenas em relação aos poros (Figura 2), ocorre perda de injetividade, distribuída ao longo do tempo.

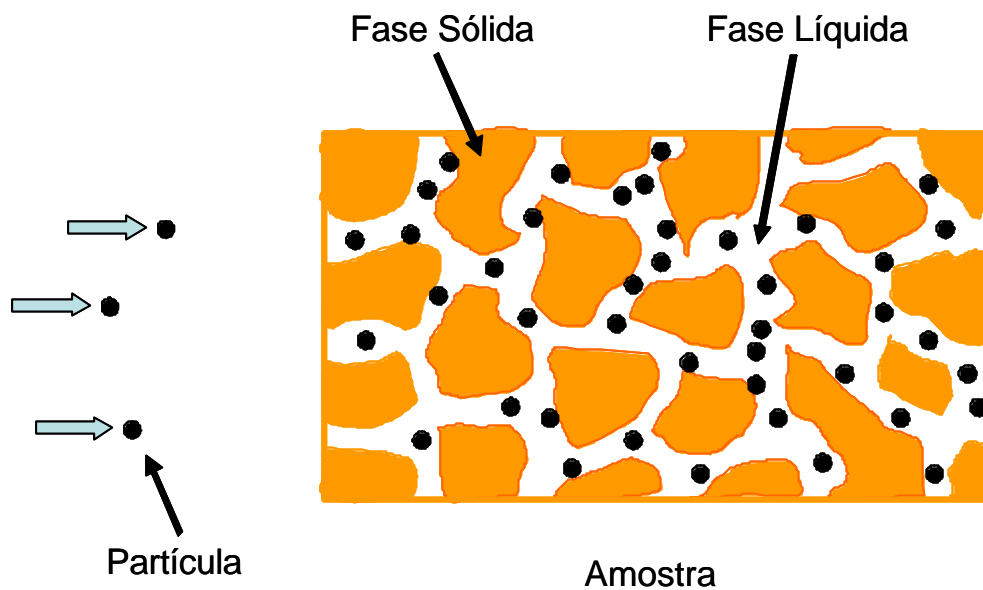


Figura 2: Exemplo da formação de dano profundo.

Quando, as partículas têm um tamanho entre  $1/3$  e  $1/7$  do tamanho do poro (Milazez e Daher, 2000) ocorre a formação de pontes de partículas, que reduzem rapidamente a permeabilidade da formação (Figura 3). Essas pontes podem ser formadas tanto internamente quanto externamente, sendo que, neste caso, elas iniciam a formação do reboco externo.

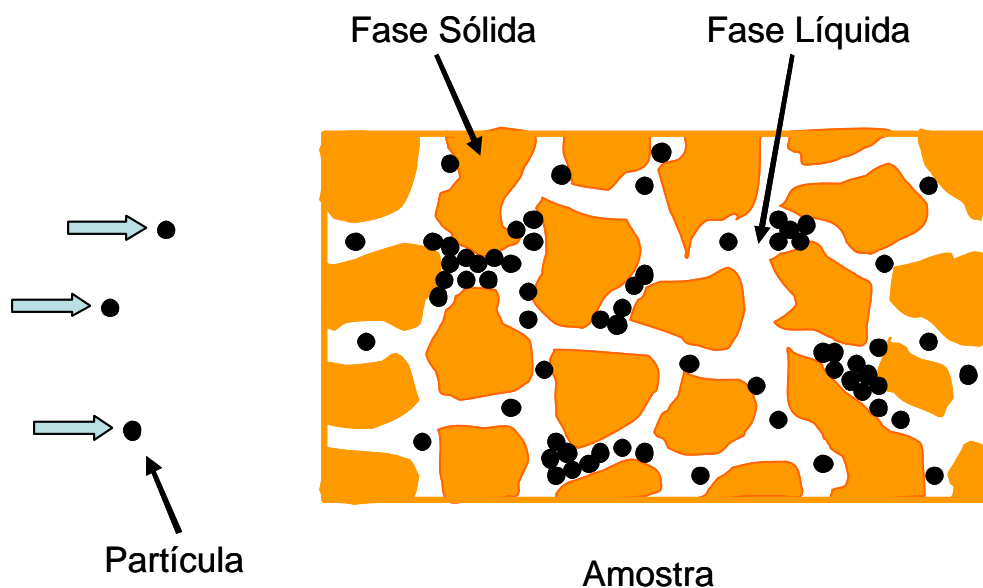


Figura 3: Formação de pontes de partículas.

É comum ocorrerem os três mecanismos em conjunto, conforme mostrado na Figura 4, inicia-se pelo dano profundo, ocorrendo a formação das pontes e finalmente do reboco externo.

Além destes mecanismos a sedimentação gravitacional e a difusão contribuem para a retenção de partículas no meio poroso.

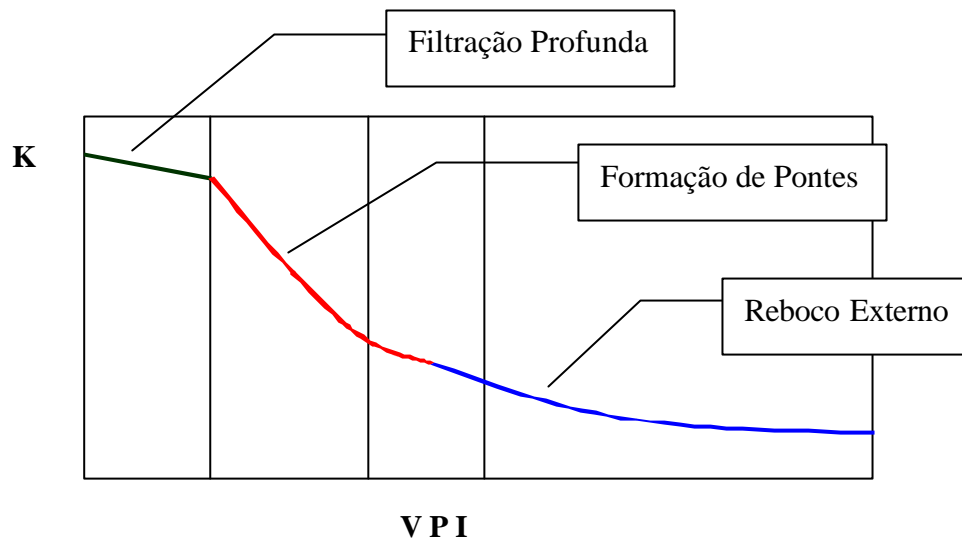


Figura 4: Gráfico de perda de injetividade por vários mecanismos.

Uma definição sobre o problema da injeção de água produzida foi dada por (Ochi et al (1999)).

“A reinjeção da água produzida para manutenção de pressão tem se tornado cada vez mais atrativa na industria 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 é devido ao pouco conhecimento dos mecanismos de dano a formação por partículas sólidas e gotículas de óleo”.

## 2.2 Modelos de Perda de Injetividade

Os estudos de declínio de injetividade remontam a década de 30 (Iwasaki (1937)) existindo atualmente vários modelos para explicarem comportamento da injetividade.



Siqueira (2000) e Rodrigues (2001) fizeram uma compilação dos modelos de perda de injetividade destacando quatro tipos de modelos.

**Modelos Estocásticos:** O fluxo de partículas no meio poroso é descrito de maneira probabilística, possuindo dois parâmetros que podem ser determinados a partir de dados experimentais, um deles é a probabilidade de ocorrência de evento de nascimento (desbloqueio de poro) e outro de morte (bloqueio de poro), em ambos os casos em uma unidade do volume poroso. Estes modelos têm a desvantagem de desconsiderar a distribuição do tamanho de partículas, a morfologia do meio poroso ou a concentração das partículas no efluente (Siqueira (2000) e Rodrigues (2001)).

**Modelos de Rede:** Esses modelos representam o meio poroso por intermédio de ligações e nós, gerados pelo método de Monte Carlo e dispostos de maneira a representarem malhas tridimensionais ou bidimensionais, onde os poros são representados pelos nós e as gargantas pelas ligações. A permeabilidade é calculada pela determinação da resistência ao fluxo dos elementos da rede, a partir de uma vazão constante ou diferença de pressão constante e pelo balanço de massa em cada nó. Os modelos de rede tentam incorporar as heterogeneidades do meio poroso, porém o grau de semelhança com um reservatório real irá depender muito das considerações adotadas e as soluções são obtidas a partir de métodos numéricos (Siqueira (2000)).

**Modelos de Análise de Trajetórias:** Estudam o fluxo de partículas no meio poroso, como se as mesmas estivessem no interior de coletores com um tubo com restrições. Geralmente estes modelos não consideram a captura por exclusão de tamanho. A partícula se deposita caso seu percurso entre em uma região entre a superfície do coletor e uma trajetória limite, podendo incluir todas as forças e momentos que agem sobre uma partícula (força gravitacional, Van der Waals, hidrodinâmicas ou iônicas). Como o balanço destas forças é geralmente complexo, as soluções são numéricas. A queda de permeabilidade é obtida através da estimativa do coeficiente de filtração e cálculo da queda de pressão ao longo do coletor através da equação de Carmam-Kozeny (Siqueira (2000)).

**Modelos Fenomenológicos:** Nestes modelos o meio poroso é tratado como um sistema fechado em uma escala muito maior que a das partículas injetadas ou dos poros. Não existe preocupação com os detalhes microscópicos do meio poroso, mas somente com seus efeitos macroscópicos como por exemplo o coeficiente de

filtração  $\lambda(1/m)$ . O comportamento das concentrações de partículas em suspensão  $c(\text{ppm})$  e a massa das partículas precipitadas  $\sigma(\text{kg}/\text{m}^3)$  são consideradas funções contínuas e suaves ao longo do tempo. Os volumes estudados devem ser suficientemente grande para poder representar as propriedades médias do meio poroso microscópico (Siqueira (2000)).

Os modelos fenomenológicos serão detalhados na próxima seção.

### **2.3 Revisão dos Modelos de Perda de Injetividade.**

Para as análises de declínio de injetividade causada por partículas sólidas ainda hoje são utilizadas as equações desenvolvidas por Barkmam e Davidson (1972). Nos últimos 30 anos as equações foram modificadas por vários autores com Hofsaess e Kleinitz (2003).

O desenvolvimento feito por Barkmam e Davidson se inicia normalizando o declínio de vazão através da relação:

$$a(t) = \frac{Q(t)}{Q_0} \quad (2.1)$$

Onde  $\alpha$  é o declínio adimensional de vazão no tempo  $t$ ,  $Q(t)$  é a vazão em  $t$  e  $Q_0$  é a vazão inicial. A análise deste parâmetro é feita pela meia vida, o tempo de meia vida é o tempo necessário para que a vazão se reduza a metade,  $\alpha(t_{1/2})=0,5$ .

Outro parâmetro essencial definido pelos autores é:

$$WQR = \frac{w}{k_c} \quad (2.2)$$

WQR (ppm/mD) é a razão da qualidade da água, onde  $w$  é a concentração de sólidos e  $k_c$  a permeabilidade do reboco. Uma forma mais moderna desta equação é:

$$W = \frac{w}{k_c} \frac{r_w}{r_c} \quad (2.3)$$

Onde  $\rho_w$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) é a densidade a água e  $\rho_c$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) é a densidade do reboco.

Ambos os parâmetros indicam a qualidade da água. Valores acima de 500ppm/mD indicam que ocorreram problemas de injetividade.

Ambos os parâmetros são ligados exclusivamente à formação do reboco externo.

O trabalho original (Barkmam e Davidson (1972)) foi feito considerando a pressão de injeção constante, mas pode ser generalizado através da Equação 2.4.

$$a = \frac{(P_f / Q)v = 0}{(P_f / Q)v} \quad (2.4)$$

Onde  $P_f$  (bar) é a pressão de injeção e  $v$ (m/s) é a velocidade de fluxo.

A equação 2.4 é equivalente a 2.1 e os tempos de meia vida calculados são os mesmos tanto para pressão como para vazão constante. Sendo, neste último caso, representada graficamente pelo seu inverso ( $1/\alpha$ ).

A formação de reboco é um caso particular da filtração em um meio poroso, onde um segundo meio poroso é gerado pelo acumulo de sólidos na face de entrada. A porosidade e a permeabilidade do reboco são consideradas constantes se não houver compressão ou descompressão do reboco, que podem ocorrer com a mudança de pressão de injeção.

Em um teste de membrana que representa a face de entrada de um meio poroso através de membrana porosa, pode-se determinar  $\Omega$  que representa as propriedades do reboco externo, através da inclinação da reta S da parte final (mais linear) de um gráfico de volume injetado versus tempo total de filtração ou de um gráfico de razão pressão/volume injetado versus volume injetado. As equações utilizadas são:

$$\text{Para o primeiro caso } W = \frac{1}{S^2} \frac{2A^2 DP}{m} \quad (2.5)$$

$$\text{Para o segundo caso } W = S \frac{A^2}{m} \quad (2.6)$$

S é a inclinação da reta,  $A$ (m<sup>2</sup>) é a área da membrana e  $\mu$ (cp) é a viscosidade da água.

Observa-se que os valores obtidos para  $\Omega$  pelas duas formas são diferentes. A maior limitação da técnica é a diferença entre um teste de membrana e um teste em meio poroso ou de comportamento de um poço. Uma membrana tem uma pequena variação no diâmetro dos seus orifícios e um meio poroso natural tem uma distribuição de tamanho de poros extensa, portanto, uma membrana que tenha a mesma permeabilidade média de uma amostra (pedaço de rocha reservatório utilizada em testes de fluxo) não apresenta a mesma queda de injetividade que este porque não são equivalentes. Uma das conseqüências desta diferença é a existência no meio poroso de um dano causado pela filtração profunda que não ocorre em testes de membranas.

Os parâmetros de Barkman e Davidson são, porém, extremamente úteis para determinar a qualidade da água de injeção.

Na década de 90, Sharma em colaboração com uma série de autores deu nova visão ao problema de perda de injetividade.

Em um dos seus primeiros trabalhos nesta área, Pang e Sharma (1994), os autores definem quatro tipos de curvas de perda de injetividade que podem ser obtidas de testes de fluxo em meio poroso.

Na figura 5 pode ser visto um exemplo da curva tipo 1, que representa a formação de reboco externo (ou de um reboco interno próxima à superfície de entrada da amostra). A curva é a representação do inverso do índice de injetividade, em função do volume poroso injetado. Verifica-se nesse caso uma relação linear.

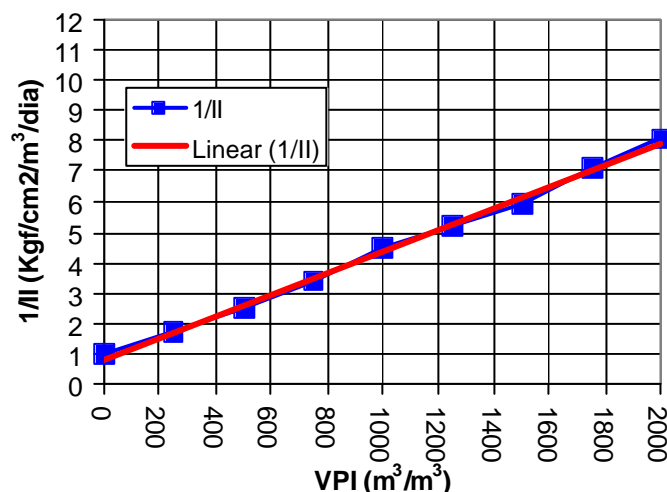


Figura 5: Curva tipo 1, forma linear.

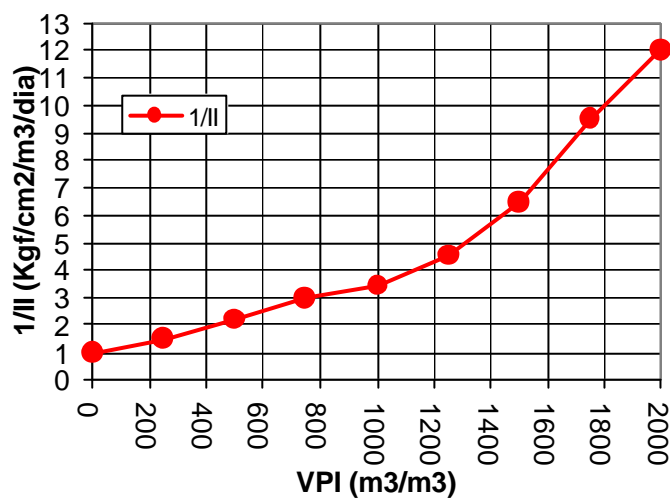
A partir das leis de Darcy e das equações do balanço de massa Pang e Sharma (1994), mostram que a inclinação da reta  $\delta$  é função das propriedades do reboco.

$$d = \frac{k_0 f_0}{k_c f_c} c \quad (2.7)$$

Onde  $c$  (ppm) é concentração de sólidos por volume,  $k_0$  é a permeabilidade original da amostra (mD),  $k_c$  é a permeabilidade do reboco (mD),  $\phi_0$  é a porosidade original da amostra(adimensional) e  $\phi_c$  é a porosidade do reboco(adimensional).

Esta relação permite calcular uma das propriedades do reboco caso se conheça a outra, mais não permite calcular simultaneamente a permeabilidade ( $k_c$ ) e a porosidade do reboco ( $\phi_c$ ).

O segundo tipo de curva mostra a formação do reboco interno ou externo,



porém de forma mais suave. A Figura 6 mostra um exemplo deste tipo de curva.

Figura 6 Curva tipo 2: Formação do reboco interno ou externo.

Apenas a parte final da curva, a partir de 1200 VPI, mostra uma tendência linear onde poderia ser aplicada a equação 2.7.

No terceiro tipo de curva, definido por Pang e Sharma (1994), não existe formação visível de reboco externo ou interno. O dano à formação é causado por partículas muito menores que o tamanho dos poros da amostra, ou seja, por filtração profunda. A Figura 7 apresenta um exemplo desta situação.

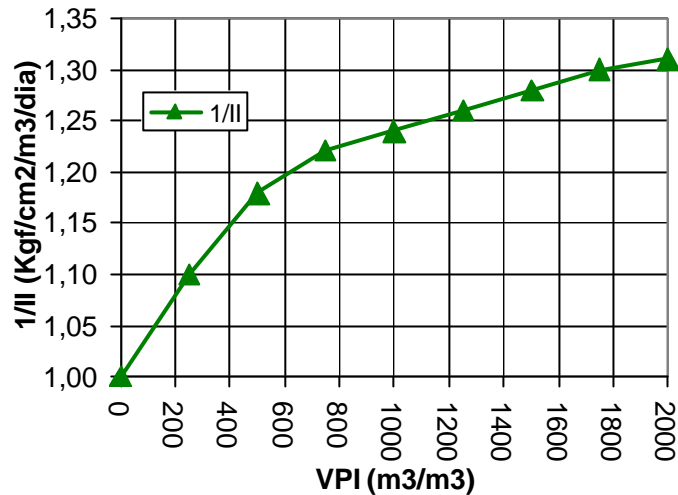


Figura 7 Curva tipo 3: Representado a filtração profunda.

Finalmente foi definida uma curva completa que combina a filtração profunda com a formação de reboco.

A Figura 8 apresenta um exemplo desta curva. Observa-se uma primeira fase de filtração profunda até 1000 VPI e outra fase com a formação de reboco após este volume injetado.

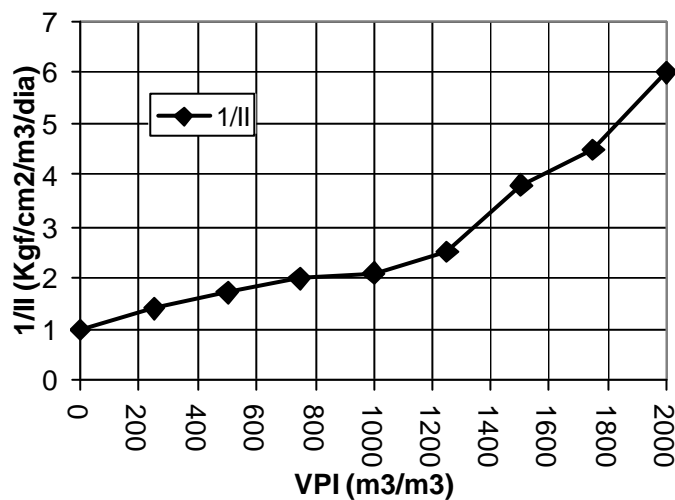


Figura 8: Curva tipo 4 curva S.

Pang e Sharma (1994), definiram como tempo de transição ( $T_{tr}$ ) o tempo ou o número de volumes porosos injetados necessários para formar o primeiro filme de reboco externo. Antes do  $T_{tr}$  ocorre a filtração profunda e a formação do reboco interno. Para uma filtração externa pura onde o diâmetro do poro é muito menor que o da partícula (como um teste de membrana) o  $T_{tr}$  será igual a 0. Para um sistema

de filtração onde o diâmetro do poro é muito maior que a partícula injetada (como em um filtro tipo “chapéu de bruxa”), o  $T_{tr}$  será infinito.  $T_{tr}$  foi definido com:

$$T_{tr} = \frac{F(n^*)}{c_n v a} \quad (2.8)$$

Onde  $c_n$  é o número de partículas por unidade de volume ( $m^{-3}$ ),  $v$  é a velocidade do fluido ( $m/s$ ) e  $a$  a área do coletor (filtro) ( $m^2$ ) e o fator  $F(n^*)$  pode ser definido como:

$$F(n^*) = \int_0^{n^*} \frac{dn}{E(n)} \quad (2.9)$$

$E(n)$  é a eficiência de captura do coletor,  $n^*$  é número de partículas necessárias para que o coletor atinja  $E=1$  e  $dn = c_n v a E(n) dt$ .

Apesar de lógica a definição do  $T_{tr}$  exige uma série de conhecimentos prévios, nem sempre disponíveis.  $E(n)$  é a eficiência de captura, sendo função do número de partículas capturadas. Esta função deve ser previamente conhecida ou simulada, dependendo de outros fatores como a área dos grãos da formação. Sharma utilizava um simulador desenvolvido por Sharma e Pang (1997) que não será detalhado nesta revisão, mas que deu origem ao programa de perda de injetividade WID (West Texas Injection Decline) (Sharma e Pang (1997)).

Para calcular o declínio de injetividade relativo, Sharma utiliza a seguinte equação:

$$\frac{II}{II_0} = 1 + (\beta n c / L)(1 - e^{-\lambda L / n})t \quad (2.10)$$

Na equação 2.10 são introduzidos dois parâmetros:  $\beta$  (adimensional) que é o coeficiente de dano à formação e  $\lambda$  ( $1/m$ ) que é o coeficiente de filtração. A equação não pode ser resolvida sem conhecer estes parâmetros.

Wennberg e Sharma (1997) apresentam uma forma de cálculo de  $\lambda$  para contornar a situação anteriormente descrita.

A partir da equação 2.11 pode-se perceber que  $\lambda$  é função da quantidade de partículas capturadas em um período de tempo, e da concentração destas partículas.

$$\frac{Q_s}{Q_t} = l_0 u c \quad (2.11)$$

O parâmetro  $\lambda_0$  (coeficiente de filtração inicial) pode ser obtido através da análise das concentrações de entrada e saída em um teste de injeção de partículas em um meio poroso através da relação:

$$l_0 = \frac{1}{L} \ln\left(\frac{C_{ENTRADA}}{C_{SAIDA}}\right) \quad (2.12)$$

Onde L é o comprimento da amostra(m).

Neste trabalho é apresentada uma revisão dos valores de  $\lambda_0$  calculados por vários autores estando seu valor entre 1 e 100 1/m.

O parâmetro  $\lambda_0$  pode ser considerado independente da velocidade é função dos tamanhos de poro da amostra e da partícula injetada. Esta relação fica clara pela constatação que um aumento da porosidade tende a reduzir  $\lambda_0$ .

É possível determinar  $\lambda_0$  através de simulações e formulações semi-empíricas com em (Wennberg e Sharma, (1997)), que apresenta a forma de calcular a  $T_{tr}$ , considerando apenas a filtração profunda:

$$\frac{Q_s}{Q_t} = l_0 (1 + b s) U c \quad (2.13)$$

Onde b é a inclinação da reta da redução de injetividade.

Resolvendo a equação 2.13 para vazão constante, que o valor de b for próximo de 0 tem-se a seguinte solução:

$$s = l_0 u c t \quad (2.14)$$

No tempo de transição ( $T_{tr}$ ) a porosidade atinge o valor crítico  $\phi^*$ :

$$T_{tr} = \frac{a}{l_0 u c} \quad (2.15)$$

O parâmetro  $\alpha$  é definido como  $\phi/\phi^*$  sendo então equivalente a  $\sigma$ , entretanto,  $\alpha$  também tem que ser estimado. Wennberg e Sharma, (1997) consideraram que um valor razoável seria 0,5.



Essas técnicas foram empregadas para construção do programa WID<sup>1</sup> da Universidade do Texas (Austin) por Sharma, e Pang (1997). O programa WID<sup>2</sup> permitiu o cálculo da perda de injetividade, para amostras e para poços, porém em testes realizados com dados de poços da Bacia de Campos o programa se mostrou difícil de utilizar e com dificuldades para o ajuste do histórico de injeção.

Além do modelo de Sharma, e Pang (1997) existem outros modelos de perda de injetividade disponíveis (Frydaman e Fontoura, 2000,) (Ria, et al, 2002), e o programa INJECT desenvolvido pelo CENPES (Shecaria, et al, 2001).

Qualquer que seja o modelo de perda de injetividade este exige uma série de suposições nos dados de entrada como a representatividade das propriedades da amostra ou do poço que influenciam no modelo de invasão ou a porosidade do reboco (Zwaag e Øyno, 1996).

## **2.4 Discussão Sobre a Modelagem Numérica**

Existem diversos trabalhos de modelagem numérica aplicada a análise da contaminação de aquíferos. Russell e Hazlett (1996) demonstram que o risco de contaminação é mínimo. Neste estudo os autores analisaram a injeção de água produzida em um aquífero que era utilizado por várias cidades como fonte de água potável. Utilizando simulação numérica eles concluiriam que mesmo após 50 anos de injeção em nove poços a uma taxa diária de 283 m<sup>3</sup>/dia o efeito nas águas captadas poderia ser desprezível.

Em outro trabalho (Gümrah et al, (1999)), os autores utilizaram um simulador baseado no método das características e os seguintes dados de entrada: um aquífero de 6500 m de largura, 5000 m de comprimento e 50 m de espessura, injetando 490 m<sup>3</sup>/dia, durante 25 anos. Novamente, a contaminação não atingiu a fronteira do simulador. Os autores também utilizaram um modelo analítico com resultados semelhantes.

---

<sup>1</sup> O programa pode ser obtido através da Universidade do Texas.

<sup>2</sup> A versão testada era a 3.1.

Okean et al, (2000) analisaram um caso real de injeção de descarte, observando que mesmo depois de uma injeção relativamente longa (30 anos) a contaminação não atingiu os limites do reservatório.

Seriam possíveis construir dois tipos modelos numéricos para este reservatório, um simplificado com células grandes (cerca de um quilometro) a partir dos estudos geológicos disponíveis (Almeida et al, (2000)). Este modelo teria a deficiência de não representar corretamente o deslocamento de partículas e íons devido dispersão numérica associada ao grande tamanho da célula.

A outra opção seria um modelo com células entre 50 e 100 m, neste modelo a dispersão numérica seria menor porque as células estariam mais próximas da ordem grandeza dos parâmetros analisados. Dois problemas dificultam sua implementação, primeiro a descrição geológica existente não é detalhada para este tamanho de célula, segundo o simulador apresentaria um numero de células entre 2 e 10 milhões causando uma tempo de processamento longo.

Por estes motivos, nesta tese não serão utilizados modelos numéricos para validar a hipótese de que a água injetada no Arenito São Tomé não aflorará rapidamente.

Apesar de não ter sido feita uma simulação numérica o enorme volume do Arenito São Tomé acima de 90 bilhões de m<sup>3</sup> de volume poroso (Almeida et al, (2000)), juntamente com a distancia entre os principais campos da bacia e a região contato do reservatório com oceano (30 a 40 Km) pode-se admitir a hipótese que dificilmente ocorreria surgência de óleo ou íons para o fundo oceânico se este reservatório fosse utilizado para injeção de descarte.

## **2.5 Abordagem Adotada**

Como nenhum método ou modelo apresenta uma forma simples e confiável de calcular os parâmetros da perda de injetividade, coeficiente de dano à formação, coeficiente de filtração, permeabilidade do reboco e a porosidade crítica, nesta tese apresenta-se mostrar um método de cálculo destes parâmetros a partir de testes de injeção de partículas em meios porosos (amostras) que pode ser facilmente aplicado para a análise do Arenito São Tomé.

### 3 Metodologia

Nesta seção serão discutidos os testes de fluxo em meio poroso, seu tratamento, e método de determinação dos principais parâmetros da perda de injetividade.

#### 3.1 Sobre o Modelo Experimental

Os testes realizados por Bruin, et al (1998) para analisar o declínio de injetividade causado por sólidos e gotas de óleo são a continuação do trabalho realizado por Trank, et al (1998). No primeiro trabalho foram efetuados 36 testes e no segundo 14 testes, compreendendo um total de 50 testes com meios porosos padronizados (Ar. Berea e Bentheimer).

O aparato experimental utilizado nos dois casos ao ilustrado na Figura 9.

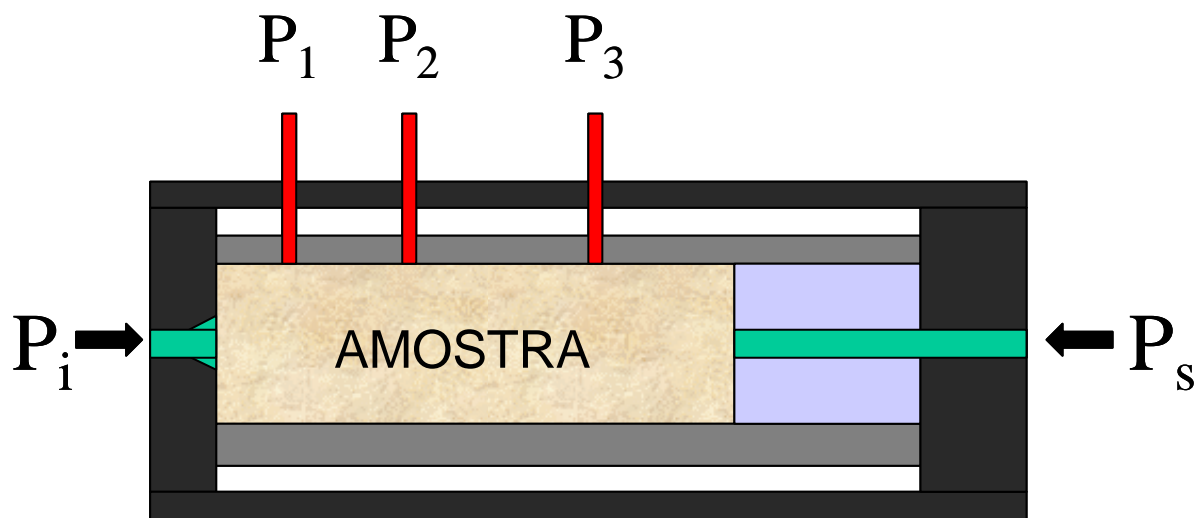


Figura 9, Esboço do equipamento utilizado.

A amostra em análise tinha sua pressão medida em 5 pontos: entrada, saída e 3 pontos intermediários. No primeiro trabalho não foi referida a posição relativa dos três pontos intermediários, porém, no segundo foi descrito que os pontos estavam a 0.5, 1.5 e 2.5 pol.(polegadas) da entrada da amostra. Como o sistema utilizado foi o mesmo pode-se assumir que nos primeiros 36 testes também foram usadas às mesmas distâncias.

Dos primeiros 36 testes, foram aproveitados 34 testes. Os dois testes descartados apresentavam problemas na leitura dos dados de queda de permeabilidade, nos casos válidos foram calculados quatro  $\Delta P$ ,  $P_i - P_1$ ,  $P_1 - P_2$ ,  $P_2 - P_3$  e  $P_i - P_f$ , e 4 permeabilidades chamadas respectivamente de  $k_1, k_2, k_3$  e  $k$ . Nos 14 testes finais só foram calculadas  $k_1, k_2$  e  $k_3$ .

Em nossas análises, foram considerados 13 dos 14 testes de Bruin, os 6 testes com injeção de partículas sólidas e os 8 testes com partículas sólidas e gotas de óleo, sendo descartado o teste com injeção somente de gotas de óleo por que este não atingiu o tempo de transição e apresentava problemas de leitura dos dados. Também foram considerados 34 dos testes de Trank, sendo 12 com injeção de partículas sólidas, 11 com injeção apenas de gotas de óleo e 11 com injeção de partículas e gotas de óleo.

Neste trabalho os teste feitos por Trank serão denominados como testes 5.1 a 5.37 e os feitos por Bruin como testes 4.8 a 4.19 e testes 4.D1 a 4.D3. Todos os testes válidos estão na Tabela F.23.

### **3.2 Metodologia Para Determinação das Permeabilidades e Impedâncias.**

Em todos os 47 testes analisados o que foi efetivamente medido foi à pressão e o  $\Delta P$  (diferença de pressão entre dois pontos da amostra), porém, estes dados não estavam disponíveis. Nos trabalhos mencionados foram apresentadas às curvas de queda de injetividade por volume poroso injetado (VPI) conforme mostrado na Figura 10.

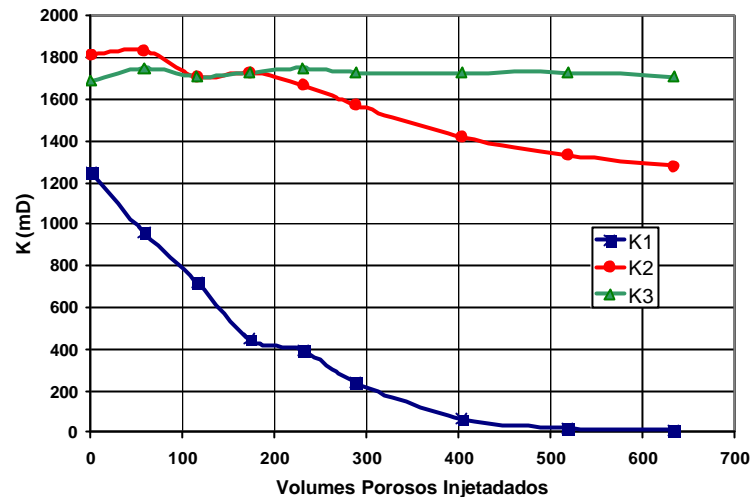


Figura 10: Resultado do teste 4.9 para a injeção de partículas sólidas.

A técnica básica para análise foi desenvolvida por Bedrikovetsky, et al (2000). Para cada teste foi calculada a queda da permeabilidade em função do  $\Delta P$  da fração da amostra, ou seja, entre dois pontos consecutivos, através da equação:

$$k_i = \frac{Q\mu\Delta L_i}{A\Delta P_i} \quad (3.1)$$

Onde  $Q$  é a vazão de líquido ( $m^3/s$ ),  $\mu$  é a viscosidade (cp),  $\Delta L_i$  é comprimento (m),  $\Delta P_i$  é o diferencial de pressão (Pa) e  $A$  é a área ( $m^2$ ).

Para nossas análises será necessário determinar o  $\Delta P$  entre a entrada da amostra e os três pontos da mesma amostra, como eram disponíveis os gráficos de  $k_i$ , os valores foram lidos para cada gráfico e efetuado o cálculo inverso:

$$\Delta P_i = \frac{Q\mu\Delta L_i}{Ak_i} \quad (3.2)$$

Foram então calculados os novos  $\Delta P$ :

$$\Delta P_n = \Delta P_i + \Delta P_{n-1} \dots\dots(n = i) \quad (3.3)$$

A partir dos novos  $\Delta P$  foi possível calcular as permeabilidades das partes da amostra da face de entrada até três outros pontos:

$$k_n = \frac{Qm\Delta L_n}{A\Delta P_n} \quad (3.4)$$

O resultado é uma nova curva de perda de injetividade, considerando esta perda desde o início até um determinado ponto da amostra. A Figura 6 mostra a nova curva para o teste 4.9.

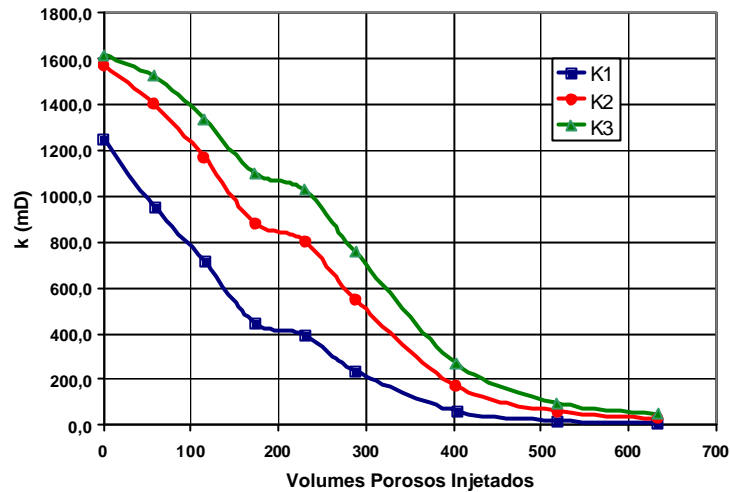


Figura 11: Resultado do teste 4.9 recalculado.

O passo seguinte é o cálculo do índice de injetividade adimensional ( $J_n$ ), dado por:

$$J_n = \frac{k_n}{k_{n0}} \quad (3.5)$$

E a construção das curvas de impedância relativa (inverso do índice de injetividade) para cada teste. Para o teste 4.9 o resultado é o seguinte:

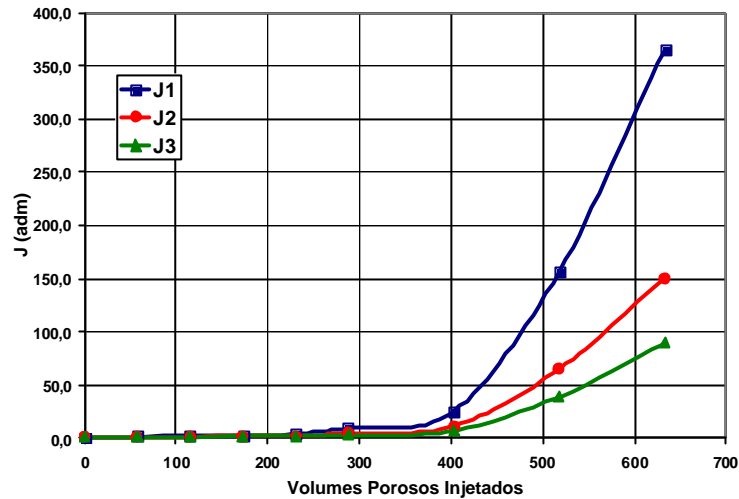


Figura 12: Impedância relativa do Teste 4.9.

Cada parte da amostra tem um diferente volume poroso a ele associado, que pode ser descrito como um múltiplo do volume original definido como:

$$VPI_n = \frac{VPI}{L_n/L} \quad (3.6)$$

Onde  $L_n$  é o comprimento do segmento da amostra (m).

Esta equação também pode ser escrita com uma função do tempo, ficando:

$$T_n = \frac{T}{L_n/L} \dots \text{onde} \dots L_n/L = ?_n \quad (3.7)$$

Isto resulta em um novo gráfico onde a impedância está associada ao volume poroso injetado em cada parte da amostra (ver figura 13).

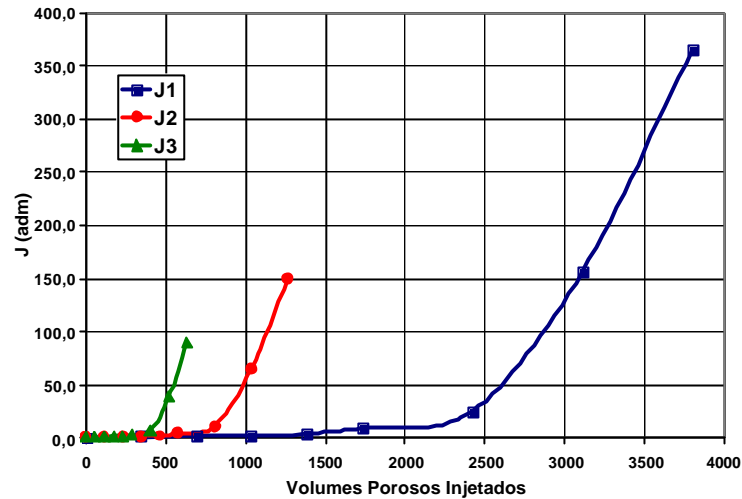


Figura 13: Impedância ajustada para os volumes porosos injetados em cada parte da amostra.

### 3.3 Método dos 3 pontos.

A nossa proposta de trabalho é utilizar a metodologia de solução desenvolvida no LENEP (Laboratório de Engenharia e Exploração de Petróleo) denominado Método dos Três Pontos (Bedrikovetsky et al, (2000), Bedrikovetsky, et al (2001a), Bedrikovetsky et al (2001b), Rodrigues (2001), Bedrikovetsky, et al, (2002)), baseada na solução das equações:

$$J(T) = 1 + m T \quad (3.8)$$

$$m = b c_m f\left(1 - e^{-I L}\right) \quad (3.9)$$

$$J_1(T) = 1 + m_1 T_1 \quad (3.10)$$

$$T_1(t) = \frac{T(t)}{w_1} \quad (3.11)$$

$$m_1 = b c_m f\left(1 - e^{-I w_1 L}\right) \quad (3.12)$$

As equações 3.8 e 3.10 são as mesmas, a menos do índice 1, que significa que estas equações são relativas a uma fração  $w_1$  da amostra total descrito na



equação 3.7. As equações 3.9 e 3.12 também são semelhantes a menos do índice 1. A dedução completa das equações está descrita no Apêndice A.

Para duas seções da mesma amostra pode-se medir o  $\Delta P$  (Figura 14), e com ela determinar a inclinação da reta na fase da filtração profunda ou entupimento (Figura 15) e escrevendo as duas equações (3.9 e 3.12) como funções de  $\beta$  e  $\lambda$  (Figura 16) podemos determinar o valores dos parâmetros.

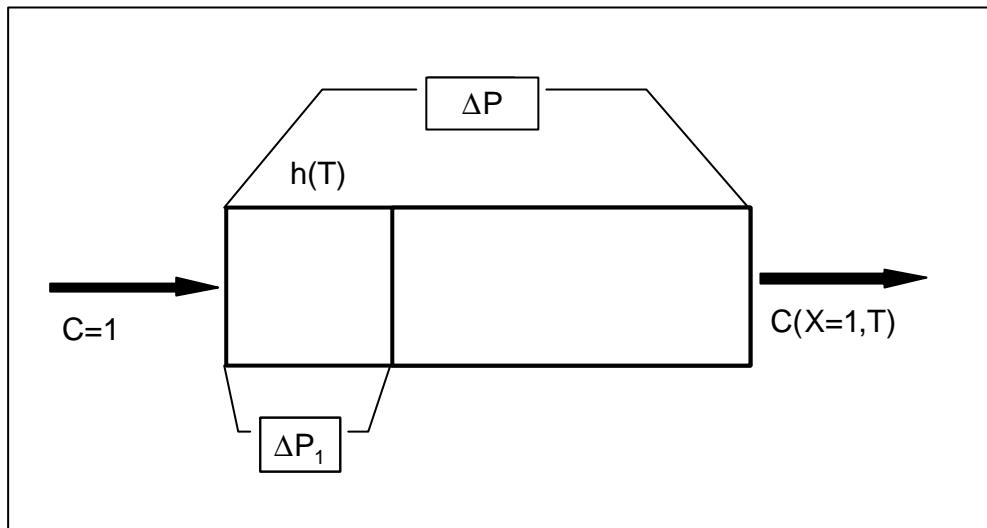


Figura 14: Representação esquemática do método dos três pontos.

No caso dos testes analisados tem-se três conjuntos de possíveis soluções gerados pelos quatro pontos de pressão disponíveis, onde para cada comprimento considerado tem-se um  $\Delta P$  e uma inclinação  $m$ . Para cada uma pode-se associar uma equação e fazer um gráfico de  $\beta$  em função de  $\lambda$ .

A solução é obtida pela interseção entre as curvas  $\beta$  em função de  $\lambda$ : o primeiro resultado será a interseção entre a primeira curva que representa a menor parte da amostra e a segunda que representa metade da amostra; a segunda será a interseção da primeira curva com a terceira, que representa a maior parte da amostra; um terceiro resultado possível é obtido da interseção das curvas dois e três. Apresenta-se abaixo um conjunto de resultados obtidos para os vários grupos testes.

Nas figuras 15, 17, 19, 21 e 23 são mostrados os exemplos de resultados para a determinação de tempo de transição ( $T_{tr}$ ) para os diferentes tipos de partículas injetadas nos testes analisados. A interceptação entre as retas determina

o  $T_{tr}$  em VPI, existem três pontos porque cada parte da amostra considerada tem um VPI proporcional ao seu comprimento. As inclinações das retas  $m$  e  $m_c$  (inclinação da reta após a formação do reboco) também são determinadas nestas figuras.

As figuras 16, 18, 20, 22 e 24 mostram exemplos da determinação de  $\beta$  e  $\lambda$  utilizando as retas  $m$  determinadas nos testes. Para cada parte da amostra é possível utilizar a equação 3.12 para construir uma curva  $\beta$  versus  $\lambda$ , nas interseções entre as curvas ocorrem um conjunto de soluções para o teste.

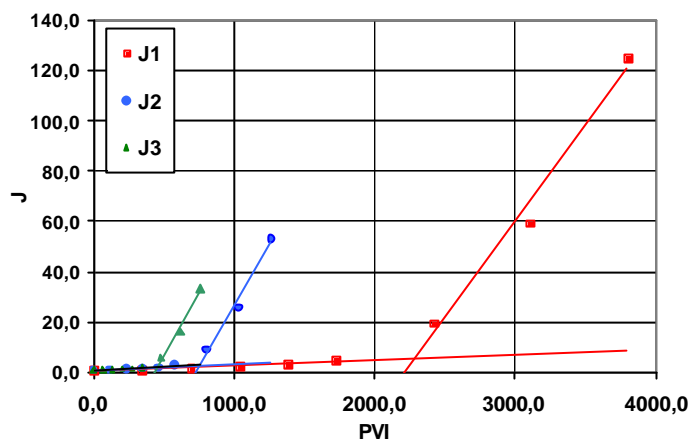


Figura 15: Exemplo de solução no gráfico de impedância para o tempo de transição para o teste 4.9 (partículas sólidas).

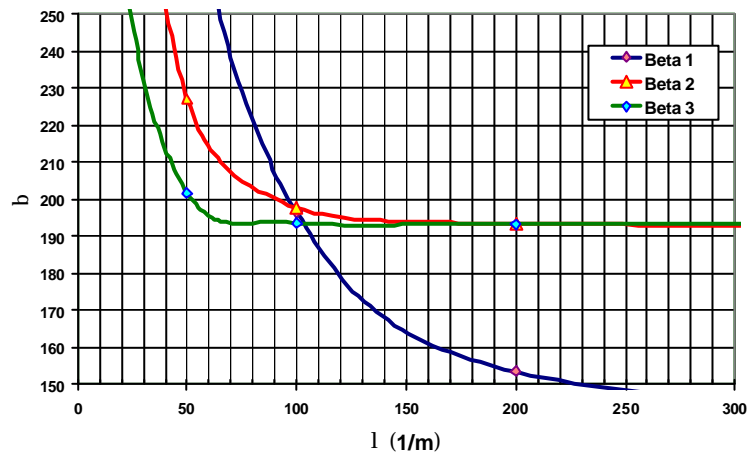


Figura 16: Exemplo de solução para  $\lambda$  e  $\beta$  obtido a partir da equação 3.12 para o teste 4.9 (partículas sólidas).

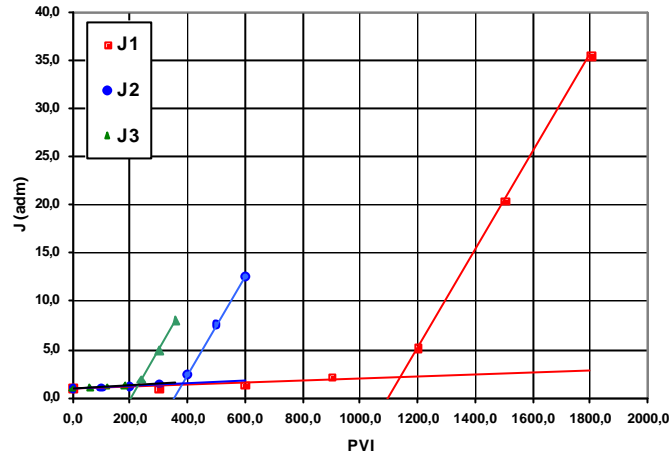


Figura 17: Exemplo de solução no gráfico de impedância para o tempo de trânsito para o teste 5.7 (partículas sólidas).

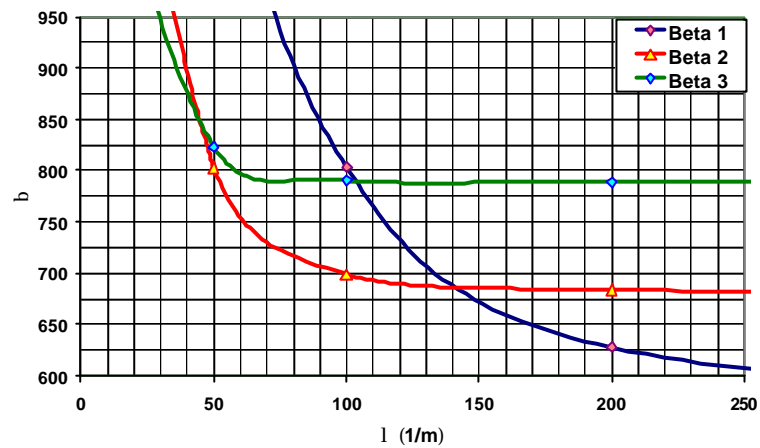


Figura 18: Exemplo de solução para  $\lambda$  e  $\beta$  obtido a partir da equação 3.12 para o teste 5.7 (partículas sólidas).

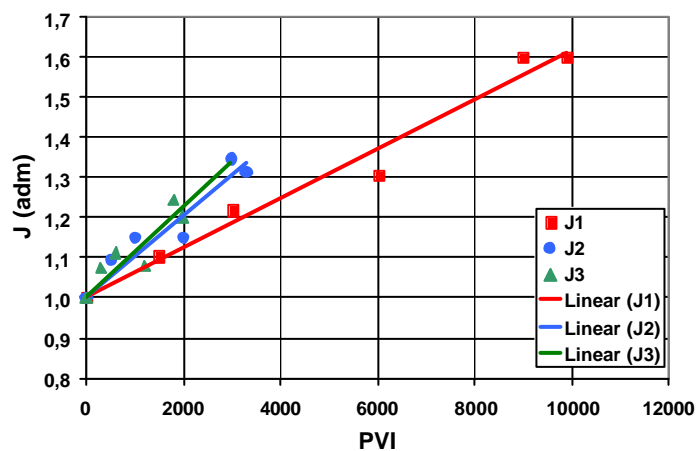


Figura 19: Exemplo de solução no gráfico de impedância para o teste 5.25 (partículas líquidas).

Para o caso dos testes com partículas líquidas, nenhum dos testes analisados atingiu o  $T_{tr}$ , sendo obtidas para eles apenas as inclinações  $m$  das retas da filtração profunda.

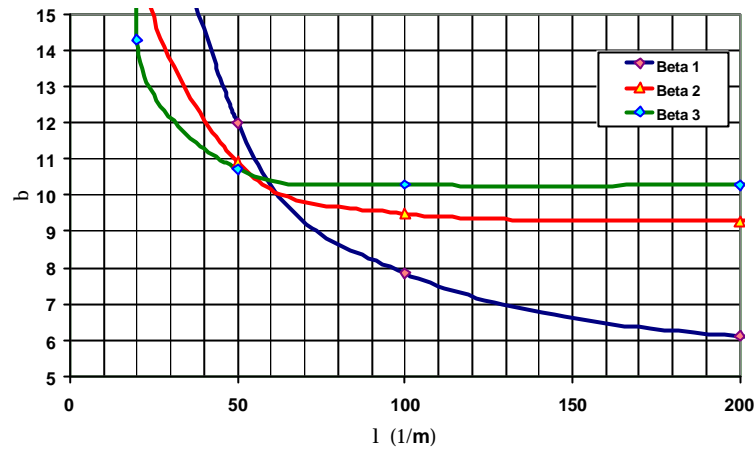


Figura 20: Exemplo de solução para  $\lambda$  e  $\beta$  obtido a partir da equação 3.12 para o teste 5.25 (partículas líquidas).

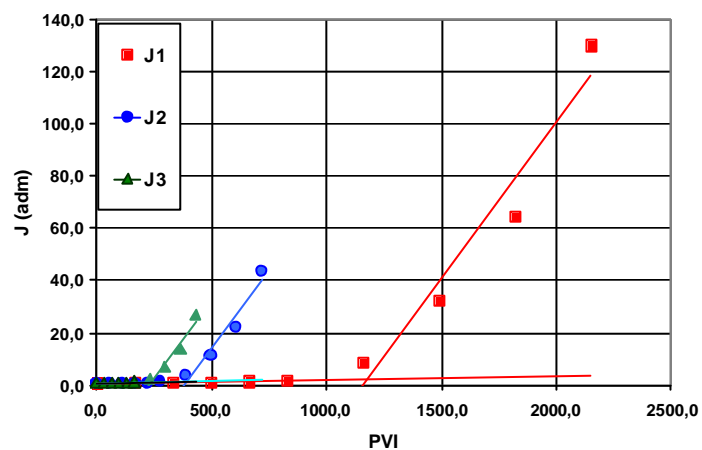


Figura 21: Exemplo de solução no gráfico de impedância para o tempo de trânsito para o teste 4.17 (partículas sólidas e líquidas).

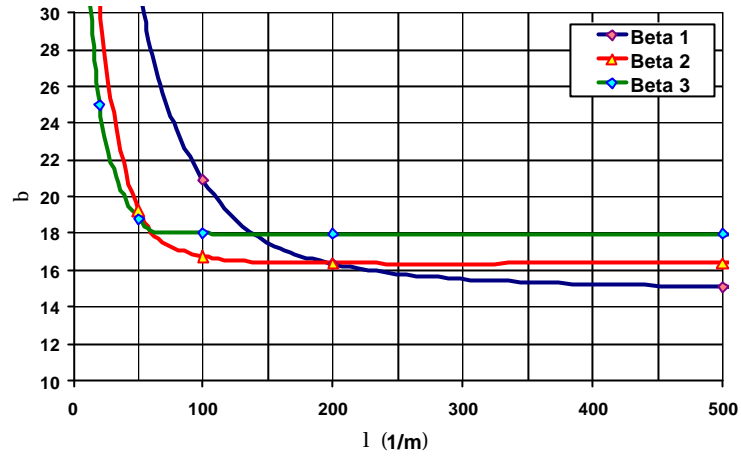


Figura 22: Exemplo de solução para  $\lambda$  e  $\beta$  obtido a partir da equação 3.12 para o teste 4.17 (partículas sólidas e líquidas).

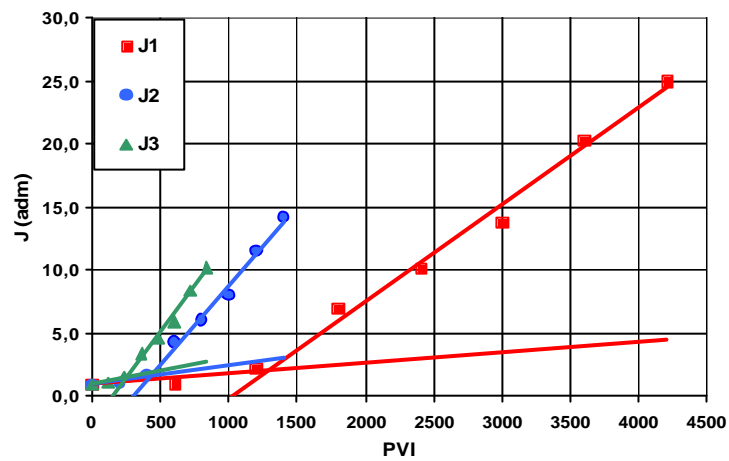


Figura 23: Exemplo de solução no gráfico de impedância para o tempo de transição para o teste 5.34 (partículas sólidas e líquidas).

Muitos dos testes deste grupo não apresentaram  $T_{tr}$  definido, o exemplo acima é um dos três testes onde foi possível calcular o  $T_{tr}$ .

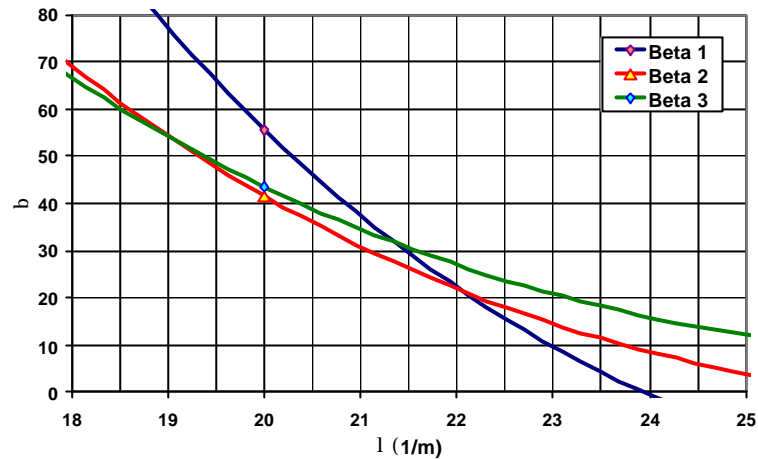


Figura 24 Exemplo de solução para  $\lambda$  e  $\beta$  obtido a partir da equação 3.12 para o teste 5,34 (partículas sólidas e líquidas)

As permeabilidades do reboco,  $k_c$ , podem ser calculadas pela equação 3.13 para cada seção da amostra:

$$k_c = \frac{k_0 c_{in} f}{m_c (1 - f_c)} \text{ para } T > T_{tr} \quad (3.13)$$

Onde  $c_{in}$  é concentração inicial de partículas,  $m_c$  é a inclinação da reta na fase de formação de reboco e  $\phi_c$  é a porosidade do reboco. A dedução completa da equação 3.13 encontra-se no Apêndice C.

Pode-se observar que o  $k_c$  é dependente da inclinação da reta  $m_c$  que só pode ser calculada caso o teste tenha um  $T_{tr}$  definido e um período posterior relativamente grande onde seja possível calcular a inclinação da reta com segurança.

O cálculo da fração de porosidade crítica ( $\alpha$ ) será baseado na equação 2.15 modificada.

A dedução completa da equação 3.14 se encontra Apêndice B e considera a existência das seções da amostra. O tempo  $T_i$  é definido da mesma forma que na equação 3.12 para cada seção da amostra.

$$T_i = \frac{a}{I_i L_i c_m} \quad (3.14)$$

## 4 Análise de Testes Realizados

Nesta seção serão calculados os valores para todos os parâmetros dos testes e analisados os resultados.

### 4.1 Testes com injeção de partículas sólidas

Foram analisados 18 testes apenas com injeção de partículas sólidas (T4.08 a T4.13 e T5.1 a T5.12). Destes, apenas 5 não atingiram o tempo de transição: 4.12, 5.8, 5.9, 5.10 e 5.12. Os resultados dos testes estão listados nas tabelas do Apêndice F (tabelas F.1 até F.5).

Analisando os testes o único que não atingiu o tempo de trânsito no grupo 4 foi o 4.12, que apresentava, para este grupo, o segundo menor diâmetro de partícula ( $4\mu\text{m}$ ) e a menor concentração (24 ppm), o que explicaria o fato de não atingir o tempo de trânsito após a injeção de 1031 volumes porosos.

Tem-se 3 grupos de testes com injeção apenas de sólidos: o grupo 4 (porosidade 26%, 6 testes), o grupo 5A (porosidade de 18%, 7 testes) e o grupo 5B (porosidade de 22%, 5 testes).

Os testes do grupo 5 que não atingiram o tempo de transição (8, 9, 10 e 12) são todos do arenito mais poroso (22%), enquanto os testes de 1 até 7 (porosidade de 18%) apresentam uma permeabilidade média de 418 mD. Os testes de 8 a 12 apresentam uma média de 1099 mD, ou seja, um diâmetro de poro muito maior de  $71\mu\text{m}$  contra  $48\mu\text{m}$ , reduzindo a perda de injetividade. Apenas um teste deste arenito apresentou tempo de trânsito, o teste 11, sendo este o de menor permeabilidade (807 mD).

Assim fica claro que altas permeabilidades e porosidades aumentam o tempo de trânsito exigindo testes maiores que os efetuados, em particular quando se injeta uma baixa concentração de partículas como nos testes do grupo 5, sempre igual ou inferior a 10 ppm (média de 5,9 ppm), em contraste com os testes do grupo 4 onde as concentrações eram maiores que 24 ppm com média de 42,2 ppm.

Para o caso dos testes que não atingiram o tempo de trânsito não foi possível calcular  $k_c$ , porque não existe a reta  $m_c$ , porém, foi possível fazer uma estimativa do valor de  $\alpha$  considerando que o último tempo medido foi exatamente o tempo de transição. Portanto, os resultados dos testes 4.12, 5.8, 5.9, 5.10 e 5.12. para o parâmetro  $\alpha$  são apenas indicativos, pois o  $T_{tr}$  poderia ser maior que o que foi utilizado nos cálculos..

Para os parâmetros  $\lambda$ ,  $\beta$  e  $\alpha$  foram calculadas duas médias: a primeira com a soma dos três valores obtidos na análise gráfica, a segunda com apenas os dois primeiros valores. O motivo para esta redução foi que, principalmente para  $\lambda$  e  $\alpha$  os resultados definidos como 1-2 são muito mais próximos que o terceiro valor.

A explicação para esta ocorrência é função do próprio método de solução gráfico: o primeiro valor é retirado da interseção entre a curva 1 (derivada da primeira e menor parte da amostra), com a curva 2 (que representa a metade da amostra). O segundo valor é definido pela interseção da curva 3 (que representa a amostra praticamente toda com a curva 1). O terceiro valor é definido pela interseção da curvas 2 e 3. Como é na primeira parte da amostra que ocorrem grande parte dos mecanismos de retenção de partículas, a ausência da curva 1, a que melhor representaria este fenômeno, prejudica o resultado do terceiro valor. Muitas vezes este valor nem sequer ocorre, pois as curvas 2 e 3 não convergem dentro da faixa normal de valores de  $\lambda$  e  $\beta$ .

Por este motivo os gráficos dos parâmetros  $\lambda$  e  $\alpha$  foram feitos para a média dos dois primeiros valores.

Vamos observar os gráficos para diversas propriedades contra o parâmetro  $\rho$  que pode ser definido com:

$$r = \frac{r_{\text{particula injetada}}}{\sqrt{\frac{k_{\text{core}}}{f_{\text{core}}}}} \quad (4.1)$$

#### 4.1.1 Análise dos parâmetros.



Nesta seção serão analisados os resultados de cada parâmetro e a sua correlação com  $\rho$ .

#### 4.1.1.1 Coeficiente de filtração ( $\lambda$ )

Em primeiro lugar vamos analisar os resultados para o coeficiente de filtração<sup>3</sup>.

Observando o conjunto de resultados para todos os testes com sólidos.

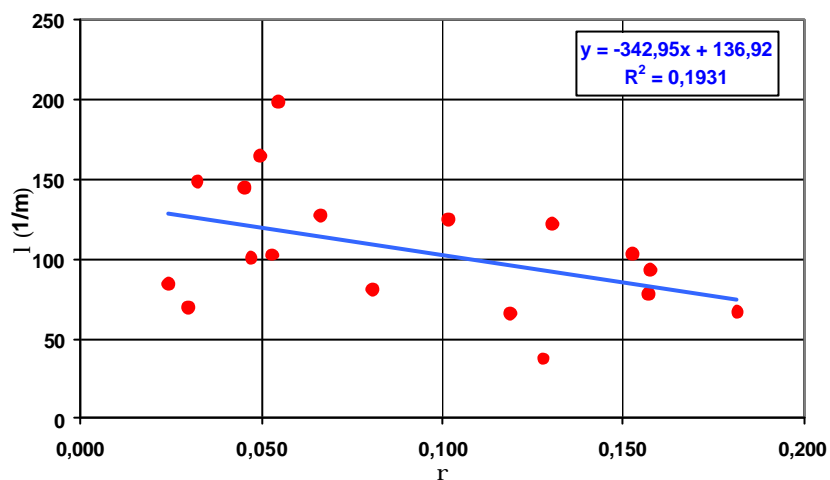


Figura 25:  $\lambda$  x  $\rho$  para os testes com injeção de sólidos apenas.

A tendência do gráfico é o inverso do esperado e este efeito não é causado pelos testes que não atingiram o tempo de transição como pode ser observado abaixo.

<sup>3</sup> Na análise de regressão, o Microsoft Excel calcula a diferença de quadrados entre o valor estimado e o valor real para cada ponto. A soma dessas diferenças de quadrados é chamada de soma dos quadrados de resíduo. O Microsoft Excel calcula a soma das diferenças de quadrados entre os valores reais e a média dos valores, que é chamada de soma total de quadrados (soma de quadrados da regressão + soma dos quadrados de resíduo). Quanto menor for a soma de quadrados de resíduo, comparada com a soma de quadrados total, maior será o valor do coeficiente de determinação,  $R^2$ , que indica a precisão com que a equação resultante da análise de regressão descreve a relação entre as variáveis. Para linhas de tendência logarítmicas, de potência e exponenciais, o Microsoft Excel usa um modelo de regressão transformado.

O mesmo efeito aparece na figura 26 redução de  $\lambda$  com o aumento de  $\rho$ , o que mostra que na prática existe uma correlação decrescente entre  $\lambda$  e  $\rho$ . A equação básica que define  $\lambda$  é:

$$\lambda = \frac{\partial \sigma}{\partial T} \frac{c}{U} \quad (4.2)$$

Onde  $U$  (m/s) é a velocidade definida pela equação de Darcy. A equação 4.2 indica que  $\lambda$  aumenta quanto mais rápido fossem capturadas as partículas pelo meio poroso, portanto as partículas serão mais rapidamente capturadas quanto maior o parâmetro  $\rho$ , pois o mecanismo principal da filtração é exclusão por tamanho. Não se observa esta tendência porque os testes tem concentrações muito diferentes. Os testes do grupo 4 têm concentrações em média 7 vezes maiores que as dos grupos 5A e 5B.

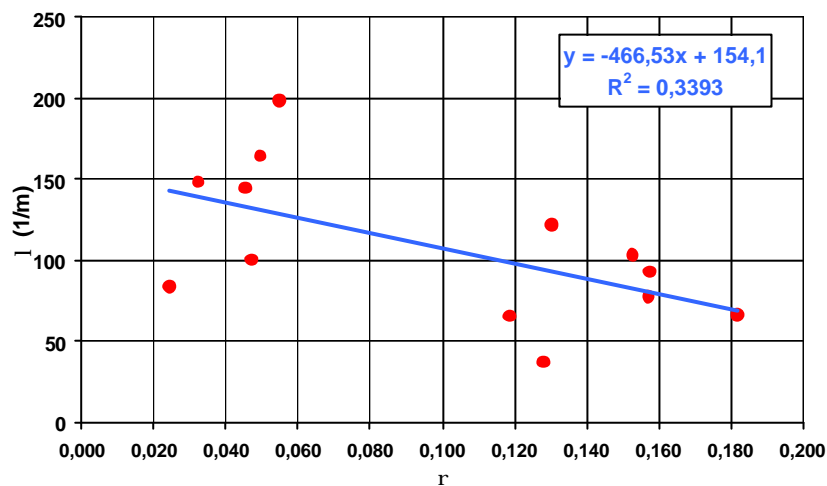


Figura 26:  $\lambda \times \rho$  para os testes com injeção de sólidos apenas, somente os testes com  $T_{tr}$  determinado.

Para incluir os efeitos da concentração de partículas na correlação do parâmetro  $\lambda$  sugere-se o uso de outra variável,  $P$  definida por:

$$P = \left( \frac{r_{\text{particulainjetada}}}{\sqrt{\frac{k_{\text{core}}}{f_{\text{core}}}}} \right) c \quad (4.3)$$

onde  $c$  é a concentração de partículas injetadas (ppm).

Nas tabelas do Apêndice F( F.6 e F.7) estão os valores calculados para a nova variável:

Refazendo as figuras 27 e 28 para esta nova correlação obtém-se as figuras abaixo:

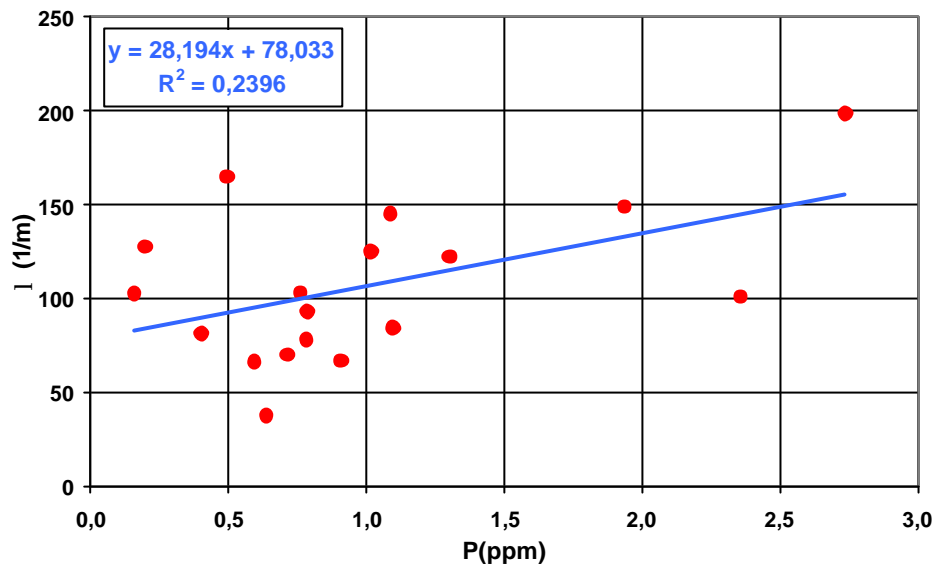


Figura 27:  $\lambda \times P$  para os testes com injeção de sólidos.

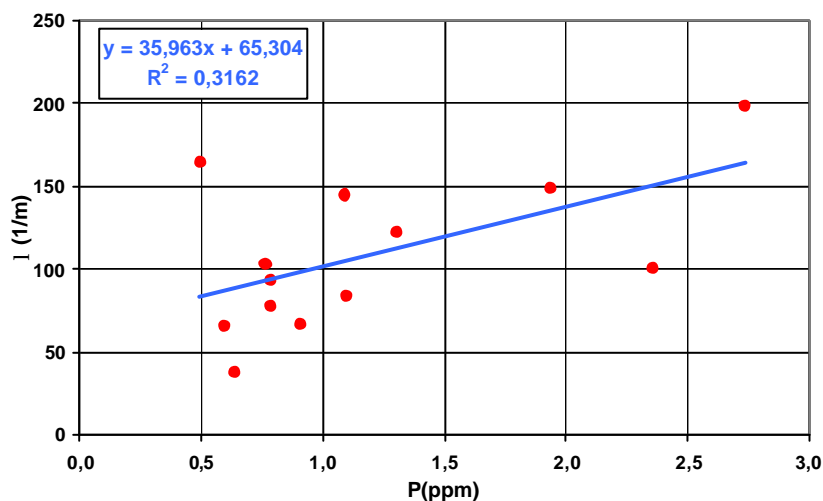


Figura 28:  $\lambda \times P$  para os testes com injeção de sólidos, somente os testes com  $T_{tr}$  determinado.

Observando os gráficos a correlação agora é crescente com o valor de  $P$ . Esta correlação representa melhor o resultado dos testes e permite sua extrapolação para outros reservatórios.

Foram também testadas outras possibilidades de correlação para  $\lambda$ , todas com resultados semelhantes a P, todas as correlações testadas e os resultados para os testes com partículas sólidas estão no Apêndice G.

As correlações tanto para P quanto para  $\rho$  mostram uma grande dispersão ( $R^2 > 0,5$ ). Essa característica é somente de  $\lambda$ , não ocorrendo para os outros parâmetros.

#### 4.1.1.2 Coeficiente de dano à formação $\beta$

Para o parâmetro coeficiente de dano à formação  $\beta$ , também foram desenhados os gráficos em relação à  $\rho$  da mesma forma que para  $\lambda$ . Os resultados são mostrados na Figura 29.

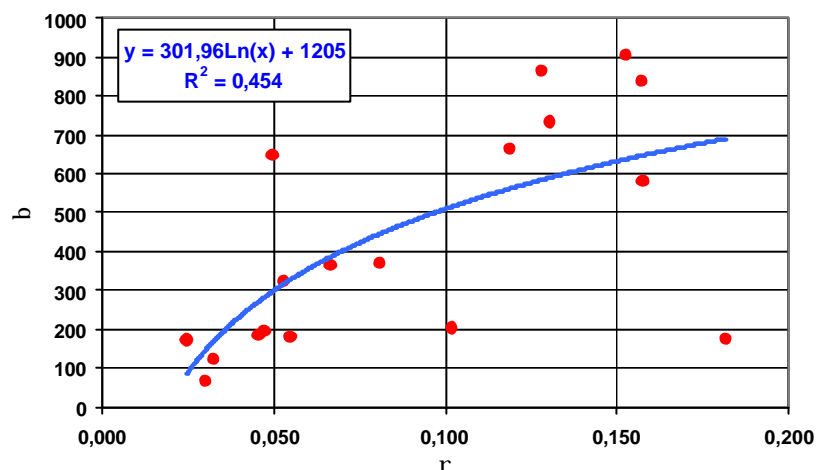


Figura 29:  $\beta$  e  $\rho$ , para sólidos todos os testes.

Quando se consideram todos os testes com sólidos é obtida uma correlação razoável para  $\beta$  em função de  $\rho$ , como foi feito para  $\lambda$ . Também foram testadas outras possíveis correlações, sendo esta a melhor correlação obtida. Novamente a soma dos diferentes grupos de testes inverte a tendência individual. O crescimento de  $\beta$  em função do aumento de  $\rho$  é uma tendência esperada, pois se espera que partículas proporcionalmente maiores causem mais dano à formação que partículas menores que tendem a se afastar mais da entrada da amostra gerando um dano pequeno mas de maior extensão. Ao contrário do que ocorre com o parâmetro  $\lambda$ , o uso da variável P não altera a tendência ou cria uma correlação mais forte.

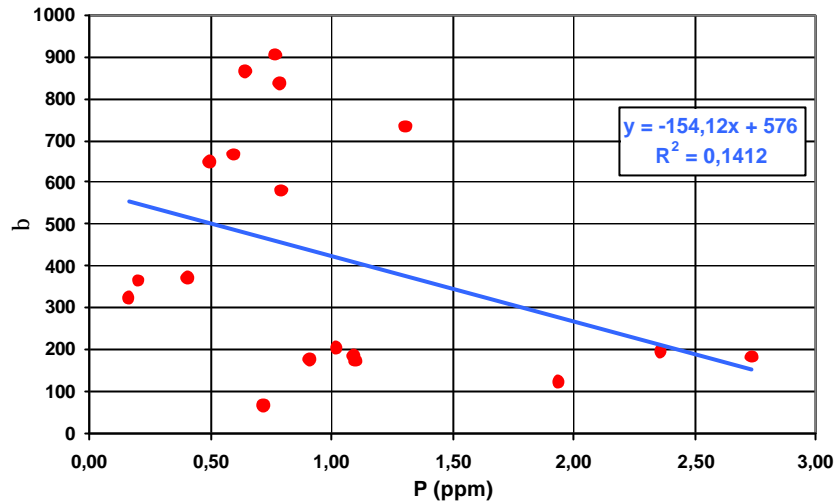


Figura 30:  $\beta$  e P, para sólidos todos os testes que atingiram o  $T_{tr}$ .

Quando não são considerados os testes que não atingiram o  $T_{tr}$  a relação entre  $\beta$  e  $\rho$  não se altera significativamente, indicando que assim como a relação  $\lambda$  e  $\rho$ , esta não é alterada significativamente pela ocorrência ou não do  $T_{tr}$  durante o teste.

#### 4.1.1.3 Permeabilidade do Reboco $k_c$

Os parâmetros a serem analisados a seguir são dependentes do  $T_{tr}$ : a fração da porosidade crítica ( $\alpha$ ) e permeabilidade do reboco ( $k_c$ ).

O parâmetro  $k_c$  pode ser calculado pela equação 3.13.

Não serão apresentados os resultados do grupo 5B, com exceção do T5.11, único teste do grupo a atingir o  $T_{tr}$ .

O único parâmetro da equação 3.14 que não foi medido ou calculado nos testes foi  $\phi_c$ . Inicialmente foi utilizado para esta análise um valor de 12% para  $\phi_c$ , que são os valores que constam nas tabelas F.8 e F.9. Foi também calculado  $k_c$  com  $\phi_c$  de 25%, o único resultado afetado pela variação de  $\phi_c$  foi  $k_c$ .

O valor utilizado nos gráficos é a média de  $k_{c1}$ ,  $k_{c2}$  e  $k_{c3}$ , porque os valores são muito próximos, no caso de  $\alpha$  existe o cálculo da média apenas de  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  que assim como ocorre com  $\lambda$  e  $\beta$  são mais representativos.

$k_c$  apresenta uma tendência de queda em função de  $\rho$  com qualquer um dos  $\phi_c$  adotados. À medida que a partícula fica proporcionalmente maior,  $k_c$  cai significativamente. A diferença entre os valores é muito pequena, em torno de 10%. Deve-se observar, que os valores calculados são baixos, uma pequena fração da permeabilidade original da amostra.

Os testes do grupo 5A apresentam o mesmo comportamento do grupo 4 para ambos os valores de  $\phi_c$ , porém os valores de  $k_c$  são significativamente menores que os do grupo 4.

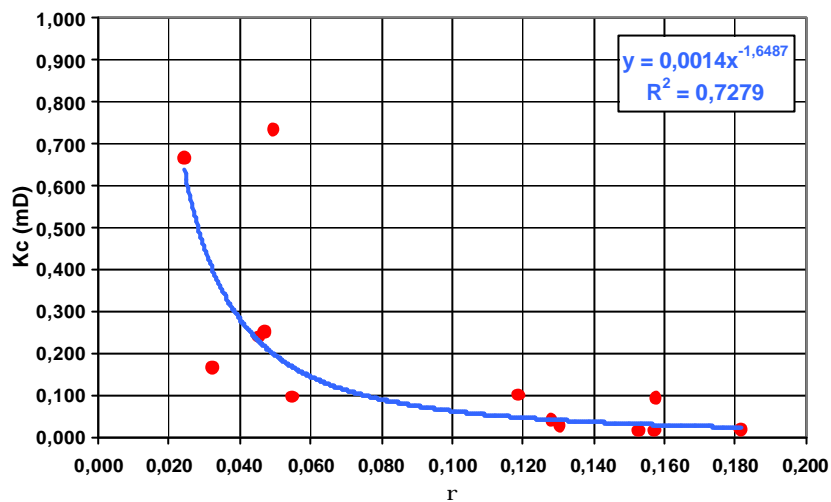


Figura 31:  $K_c$  e  $\rho$ , para sólidos todos os testes que atingiram o  $T_{tr}$  ( $\phi_c=12\%$ ).

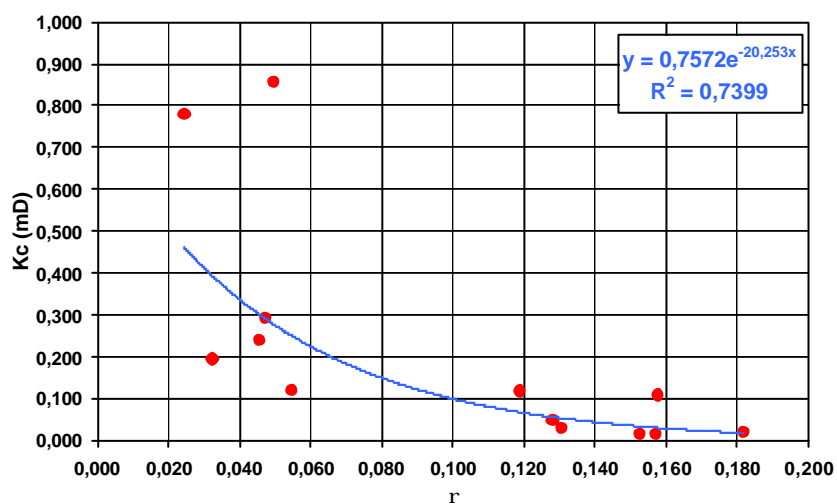


Figura 32:  $K_c$  e  $\rho$ , para sólidos todos os testes que atingiram o  $T_{tr}$  ( $\phi_c=25\%$ ).

A análise de todos os testes para  $k_c$  indica uma tendência de queda com o aumento de  $\rho$ , tendência essa de caráter exponencial. Porém os pontos ainda estão divididos em dois grupos.

Uma explicação para esta tendência é o fato das partículas relativamente menores penetrarem mais no meio poroso até atingir um ponto onde possam iniciar a formação do reboco interno. Elas necessitam percorrer um caminho maior até encontrar uma garganta de poro pequena o suficiente para iniciar o processo. Devido a este fato, o volume onde ocorre a formação do reboco é maior e existem ainda alguns poros grandes livres que permitem a passagem do fluido injetado o que resultaria em uma  $k_c$  maior.

#### 4.1.1.4 Fração da Porosidade Crítica (a)

O próximo parâmetro a ser discutido é a fração da porosidade crítica ou volume relativo depositado ( $\alpha$ ), que representa a parte ocupada da amostra pelas partículas injetadas. Para o seu cálculo é utilizada a equação 3.14.

##### 4.1.1.4.1 Considerações Iniciais

Poderia ocorrer o questionamento que esta fórmula de cálculo de  $\alpha$  não teria sentido pelo fato de que o valor de  $\alpha$  ser constante não importando o comprimento da amostra, de modo que não poderiam existir 3 valores de  $\alpha$  dos quais se faria uma média para obter o valor final. A forma correta seria calcular todos  $T_{tr}$  para cada parte da amostra com o volume poroso total, definir um  $T_{tr}$  médio e então calcular  $\alpha$  considerando um  $\lambda$  médio ( $\lambda_o$ ).

Na prática os valores calculados das duas formas apresentam um diferença muito pequena, em média de apenas 0,5%.

$$\frac{(\sum T_i I_i L_i C_m)}{i} = T I_o L C_m \quad (4.4)$$

Observando a equação 4.4 pode-se perceber a equivalência do cálculo, na verdade  $T_i L_i$  tem o mesmo valor de  $TL$ , pois se  $T_i$  é  $T$  dividido por  $\omega_i$ ,  $L_i$  é  $L$  multiplicado por  $\omega_i$ , e  $\lambda_o$  é a média dos valores de  $\lambda_i$ .

Quanto à impossibilidade da existência de mais de um valor de  $\alpha$  deve-se lembrar que a solução gráfica leva a 3 diferentes valores de  $\lambda$ , onde só deveria existir um valor. Para os objetivos da presente tese, considera-se que o valor médio de  $\alpha$  calculado pela equação 4.4 é representativo da amostra analisada.

#### 4.1.1.4.2 Análise dos Resultados

Como muito testes não apresentavam um  $T_{tr}$  definido, não deveria ser possível calcular  $\alpha$  para todos eles, porém foi considerado que nos testes que não atingiram o  $T_{tr}$ , o último ponto lido era exatamente o  $T_{tr}$ . Em razão desta hipótese, os resultados destes testes foram encarados com restrição e analisados individualmente.

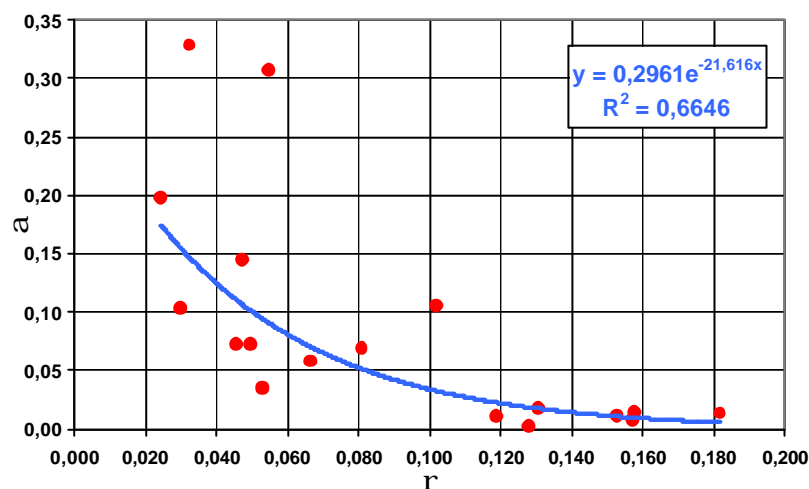


Figura 33:  $\alpha$  e  $\rho$ , para sólidos os testes de todos os grupos.

Quando se consideram todos os resultados obtidos, inclusive as estimativas para  $\alpha$ , observa-se uma sólida tendência de queda de  $\alpha$  em função do aumento de  $\rho$ . Esta é a tendência esperada para o comportamento de  $\alpha$ , devido ao fato de que as partículas relativamente pequenas entram mais profundamente e por mais tempo no sistema poroso.

Não existe nenhum ganho de correlação quando se faz o gráfico  $\alpha$  contra  $P$ .



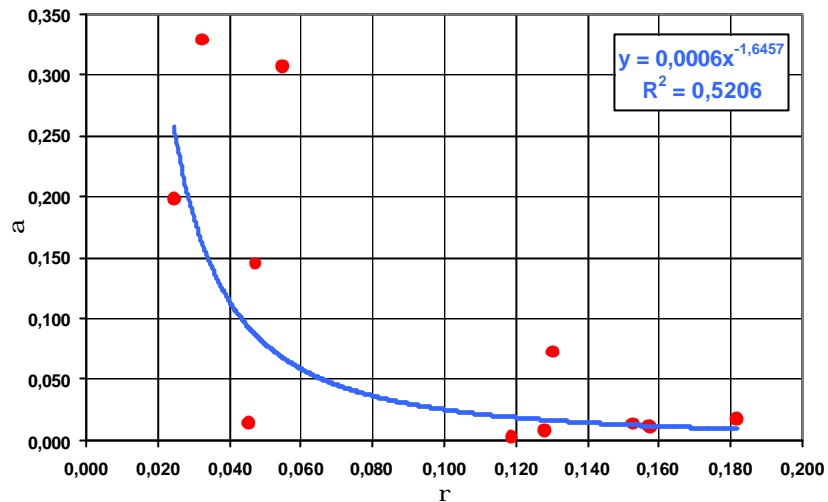


Figura 34:  $\alpha$  e  $\rho$ , para sólidos os testes de todos os grupos, apenas testes que atingiram  $T_{tr}$ .

Mesmo com a retirada de todos os testes sem  $T_{tr}$  definido, mantém-se a mesma tendência de queda de  $\alpha$  com o crescimento de  $\rho$ . Este resultado possibilita afirmar que o cálculo de  $\alpha$ , apesar de dependente do  $T_{tr}$ , pode ser utilizado para testes razoavelmente longos com injeção apenas de partículas sólidas. Neste caso, o  $T_{tr}$  pode ser aproximado pelo valor do último tempo reportado, porém os resultados devem ser comparados com outros de testes em amostras semelhantes, e encarados com as necessárias reservas.

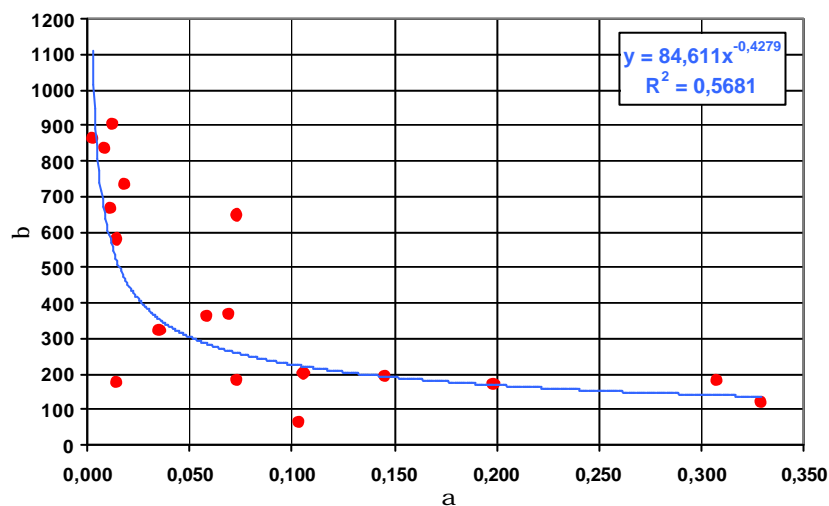


Figura 35:  $\alpha$  e  $\beta$ , para sólidos os testes de todos os grupos ajuste com uma curva de potência.

Outra tendência encontrada foi entre os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ . A correlação tem sentido quando se observa os gráficos 29 ( $\beta$  versus  $\rho$ ) e 34 ( $\alpha$  versus  $\rho$ ). No gráfico 29 o aumento de  $\beta$  resulta no aumento de  $\rho$ . No gráfico 34 o aumento de  $\rho$  resulta na queda de  $\alpha$ , a combinação desta duas tendências é o que ocorre no gráfico 35.

O significado físico da correlação entre  $\alpha$  e  $\beta$  é que um grande dano pode ser provocado por um pequeno número de partículas grandes o que resultaria em um pequeno espaço ocupado. À medida que a concentração de sólidos sobe e o tamanho da partícula injetada cai o dano vai sendo reduzido apesar do volume ocupado aumentar. Isto ocorre em função do maior espalhamento das partículas no meio poroso, que não se concentram mais tanto nas proximidades da face de entrada da amostra.

A correlação  $\alpha$  e  $\beta$  não foi encontrada na revisão bibliográfica.

A boa correlação entre  $\alpha$  e  $\beta$  permite estimar o valor de  $\alpha$  mesmo que o teste não tenha uma boa definição do  $T_{tr}$  e resolver a determinação da filtração profunda sem o uso do método dos 3 pontos através da solução do sistema de equações abaixo.

$$T_{tr} = \frac{\alpha}{\lambda L c_0} \quad (4.5)$$

$$m = \beta c_0 \phi \left( 1 - e^{-\lambda L} \right) \quad (4.6)$$

$$\beta = 84,611 \alpha^{-1,6457} \quad (4.7)$$

Como exemplo, na figura 36 é mostrada a solução do teste 4.9 do uso da correlação (4.7) e das equações 4.5 e 4.6.

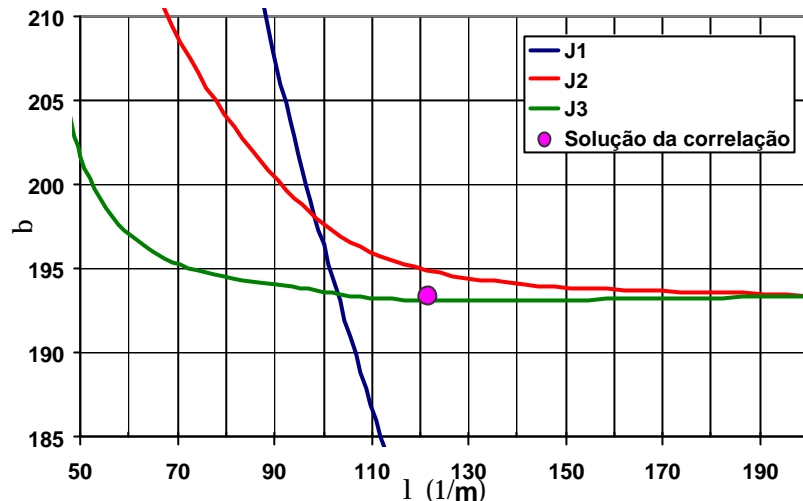


Figura 36: Comparação das soluções pelo método dos 3 pontos e pelo sistema de equações 4.5, 4.6 e 4.7.

Como pode-se observar a solução pelo sistema de equações fica dentro do campo de solução do método dos 3 pontos.

#### 4.2 Testes com partículas líquidas

Nesta seção serão apresentados os resultados dos testes com injeção de partículas líquidas. Foram analisados apenas 11 testes com partículas líquidas. Isto ocorreu porque o único teste de injeção de partículas líquidas do grupo 4 e 2 testes de injeção de partículas líquidas do grupo 5 tinham problemas de leitura de dados e não puderam ser interpretados. Todos os testes com gotas de óleo apresentam o mesmo comportamento básico com pequena queda de injetividade sem a observação de um tempo de transição.

Os resultados foram calculados e comparados com os resultados dos testes de partículas sólidas e os testes com a injeção conjunta de partículas sólidas e líquidas. Os testes estão nas tabelas F.10 até F.12

Pode-se observar que nenhum teste atingiu o  $T_{tr}$ , assim o parâmetro  $\alpha$  foi estimado considerando como o  $T_{tr}$  o último tempo apenas para comparação com os resultados de partículas sólidas. As variáveis  $\rho$  e  $P$  foram também calculadas com as mesmas fórmulas das empregadas para partículas sólidas.

Assim como nos testes com sólidos os testes do grupo 5 para gotas de óleo foram efetuados em dois tipos de amostra: um com 18% de porosidade e permeabilidade 500 mD a 750 mD (em branco na tabela F.12) e 22% de porosidade e permeabilidade entre 750 mD e 1,2D (em cinza na tabela F.12). Como os resultados não apresentam diferenças significativas, serão analisados conjuntamente.

A explicação mais provável para a não formação de reboco e a conseqüente não ocorrência de  $T_{tr}$  é que as gotas de óleo apesar de se acumularem inicialmente na face da amostra não formam um reboco e sim uma fase quase contínua que acaba penetrando no amostra pela pressão de injeção.

Fenômeno semelhante foi observado por Ochi et al (1999), em seus testes com filtros de membranas e não com amostras. Como já foi demonstrado que as partículas se depositam preferencialmente na entrada da amostra, e praticamente toda perda de injetividade se dá nos primeiros milímetros da amostra, para facilitar os experimentos eles utilizaram membranas filtrantes, que são muito mais baratas e uma boa aproximação para a formação de reboco.

Os experimentos utilizavam óleo sintético em concentrações de 200 a 1000 ppm e gotas de tamanho em torno de 10  $\mu\text{m}$  e a membrana utilizada equivalia a um tamanho de poro correspondente a um arenito de 100 a 200 mD.

A formação de reboco apenas com a injeção de óleo pode ser explicada pela baixa vazão dos experimentos, da ordem 0,6 a 3,48 l/hora, grandes concentrações de óleo (200 a 1000 ppm) e volume injetado relativamente grande. O reboco formado foi descrito com um filme de óleo composto por gotas de 50  $\mu\text{m}$  (bem maiores que as injetadas). Na maioria dos casos as gotas que ultrapassavam o reboco eram da ordem de 1  $\mu\text{m}$ , porém em casos de  $\Delta P$  elevados algumas gotas do reboco também podiam passar (esmagamento). Os autores tentaram usar uma água de produção real, porém sem sucesso, segundo eles devido à “extrema dificuldade de manter a característica de entrada de uma emulsão real”.

No caso dos testes analisados a vazão relativamente alta, a grande permeabilidade da amostra e a baixa viscosidade das gotas de óleo permitiu que as gotas de óleo migrassem para dentro da amostra não formando um reboco e nem reduzindo a permeabilidade.

#### 4.2.1.1 Análise de parâmetros

Como nenhum teste atingiu o  $T_{tr}$  não foi calculado o  $k_c$ , Os resultados de  $\lambda$  estão no gráfico abaixo.

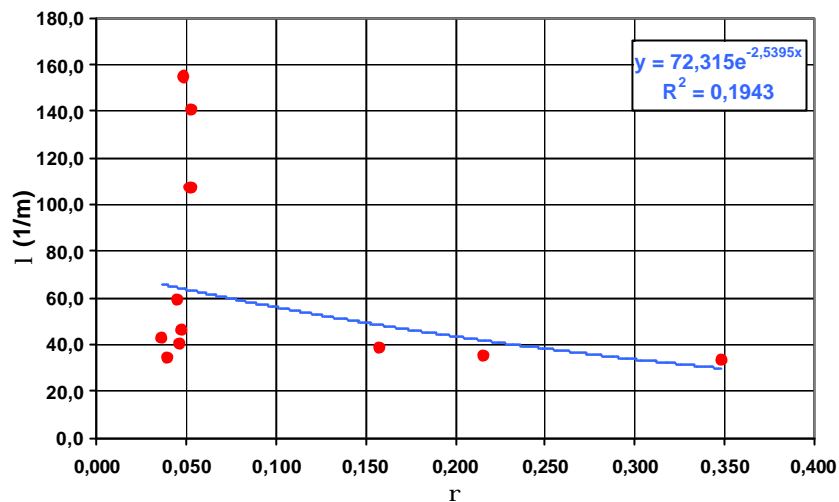


Figura 37:  $\lambda$  contra  $\rho$ , para líquidos.

A tendência de  $\lambda$  é a mesma encontrada nos testes para partículas sólidas. Deve-se observar que o valor médio para  $\lambda$  para todos os testes com partículas sólidas é 89,0 1/m (grupo 5), e que a média para os testes de partículas líquidas é de 66,8 1/m quando se considera apenas os dois primeiros valores e 58,7 1/m com os três valores, assim os valores de  $\lambda$  calculados para partículas líquidas é da mesma ordem de grandeza que ocorre com partículas sólidas.

A concentração de valores de  $\rho$ , entorno de 0,05 é devido que a maior parte dos testes tinha gotas de óleo com o mesmo diâmetro (6  $\mu\text{m}$ ), com pode ser observado na Tabela F.12.

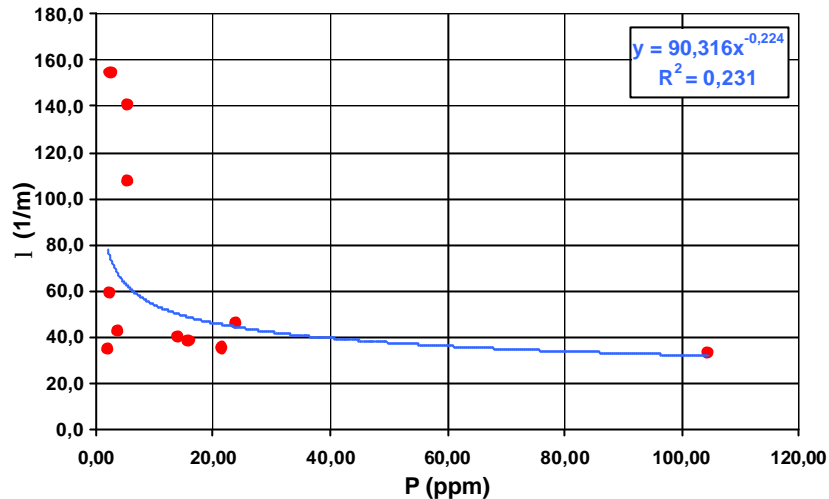


Figura 38:  $\lambda$  contra P, para líquidos.

Assim como ocorre para sólidos a utilização da variável P aumenta a correlação. Pelos testes analisados pode-se afirmar que partículas líquidas têm o mesmo comportamento que partículas sólidas no que se refere ao parâmetro  $\lambda$ .

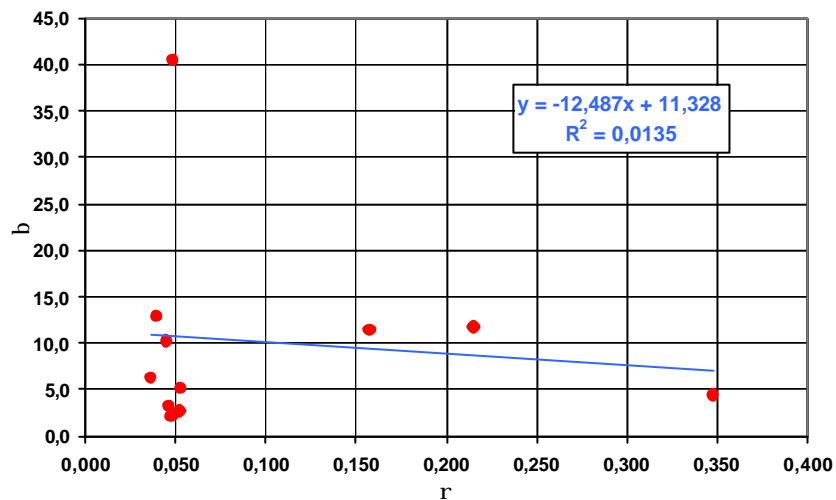


Figura 39:  $\beta$  contra  $\rho$ , para líquidos.

Não ocorre correlação significativa entre  $\beta$  e  $\rho$ , porém percebe-se que os valores de  $\beta$  são mais baixos que os obtidos com os testes de partículas sólidas. Apenas 10,5 contra a média de 556 para os testes com sólidos do grupo 5. Esses valores fazem sentido porque as partículas líquidas tendem a continuar a se deslocar no meio poroso criando um dano pequeno, porém amplo. Os fatores presentes neste processo são a baixa densidade do óleo, que anula a força

gravitacional e reduz a captura das partículas e a agregação das gotas de óleo, que permite a formação de uma fase contínua de óleo no início da amostra, aumentando substancialmente o tamanho da gota no restante da amostra, reduzindo a tensão superficial e permitindo a passagem da mesma por poros menores que o tamanho da gota (efeito Jamil, Dake, (1978)).

Isto ocorre no caso de meios molháveis à água, não existindo uma atração das gotas de óleo com a superfície do meio. Esses fatores permitem que gotas de óleo percorram caminhos substancialmente grandes antes de pararem de se mover, criando uma grande zona de invasão, porém com baixo dano.

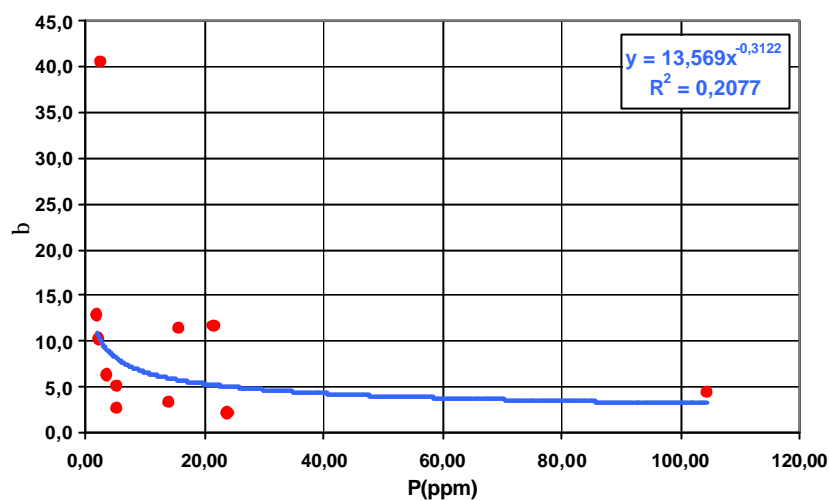


Figura 40:  $\beta$  contra P, para líquidos.

O uso da variável P tem uma correlação melhor que a variável  $\rho$ , porém ainda muito baixa. O motivo da melhora é que a faixa de valores de  $\rho$  é relativamente estreita enquanto a de P é mais ampla, sendo a correlação dominada pela  $c_0$  (concentração de partículas líquidas).

Na figura 41 estão desenhados resultados para  $\alpha$ , não existe correlação. O fato a ser observado é que muitos valores superam a unidade e temos apenas dois deles abaixo de 0,50.

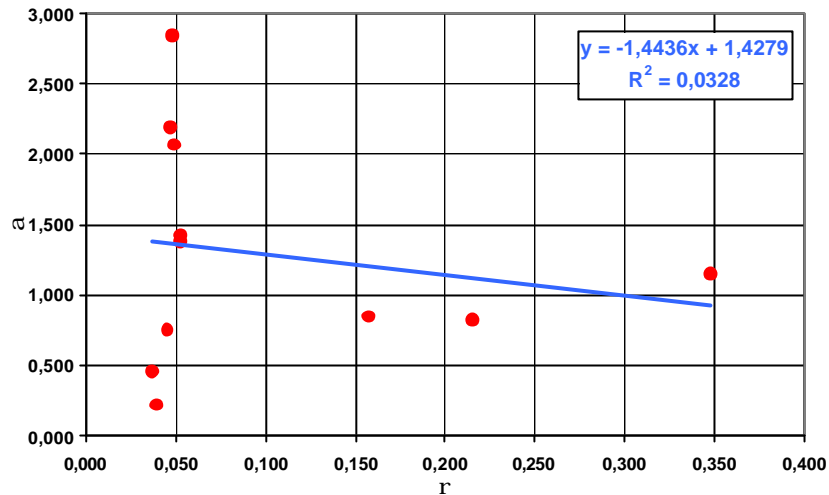


Figura 41:  $\alpha$  contra  $\rho$ , para líquidos.

Como é impossível ocupar mais de 100% do espaço poroso ou mesmo um valor menor(0,5) e continuar a ocorrer fluxo, está claro que não é possível calcular  $\alpha$  através da equação 2.11(considerando que as partículas líquidas se comportam da mesma forma que as partículas sólidas no meio poroso). Considerando os baixos valores de  $\beta$  que ocorrem nestes testes pode-se acreditar que uma parte substancial das gotas de óleo atravessou as amostras e não ficando retidas.

### 4.3 Testes com Partículas Sólidas e Líquidas

Nesta seção apresenta-se os resultados dos testes com injeção de partículas sólidas e líquidas (misturas).

Foram analisados um total de 19 testes com injeção simultânea de partículas sólidas e líquidas, 8 do grupo 4 e 11 do grupo 5. Os testes do grupo 4 são caracterizados por concentrações altas de partículas sólidas (acima de 22ppm) e líquidas (acima de 250ppm) e os do grupo 5 por concentrações elevadas das partículas líquidas apenas (maiores que 100ppm). Para o cálculo das variáveis  $\rho$  e  $P$  foram considerados:

$$C_t = C_S + C_l \quad (4.8)$$



$$D_p = \frac{(D_{p_s} \times c_s + D_{p_l} \times c_l)}{c_t} \quad (4.9)$$

Assim, a concentração é a soma das concentrações de partículas líquidas e sólidas e o diâmetro médio da partícula é a média dos diâmetros das partículas líquidas e sólidas ponderada pelas concentrações.

Essas suposições são válidas quando se considera que ambos os tipos de partículas têm o mesmo efeito em relação à perda de injetividade no meio poroso.

Os resultados obtidos para os 19 testes são mostrados nas tabelas F.13 até F.18 do Apêndice F.

Pode-se observar que um teste não atingiu o  $T_{tr}$  no grupo 4 (4.18), porém no grupo 5 somente 3 testes atingiram o  $T_{tr}$ : o 5.31, 5.34 e 5.35. O caso do teste 4.18 é o de menor concentração de sólidos no seu grupo, enquanto os testes do grupo 5, que atingiram  $T_{tr}$  são os que têm as maiores concentrações e diâmetros de partículas sólidas do seu grupo. Estas observações já indicam o papel preponderante das partículas sólidas na formação do reboco.

#### 4.3.1.1 Coeficiente de Filtração ( $\lambda$ )

Os resultados do coeficiente de filtração são diferentes nos dois grupos de testes: no primeiro grupo a média de  $\lambda$  é 110,5 1/m, semelhante aos obtidos nos testes com partículas sólidas e com partículas líquidas enquanto os testes do grupo 5 apresentam  $\lambda$  mais baixos, da ordem de 45 1/m, semelhantes a líquidos.

Os resultados para cada grupo estão nas tabelas F.17 e F.18. Deve-se observar que os testes do grupo 5 também apresentavam menores valores de  $\lambda$  nos testes de partículas sólidas e todos os testes com injeção de partículas líquidas eram do grupo 5, o que indicaria uma tendência deste grupo a valores mais baixos de  $\lambda$  pelas suas características físicas e não pelo tipo de partícula.

Quando analisados os testes D.3 e 5.30/33/35 apresentaram valores de  $\rho$  muito altos, complemente fora do intervalo de valores dos outros testes, sendo assim eliminados da correlação. Para todos os testes válidos podemos traçar o gráfico da figura 42.

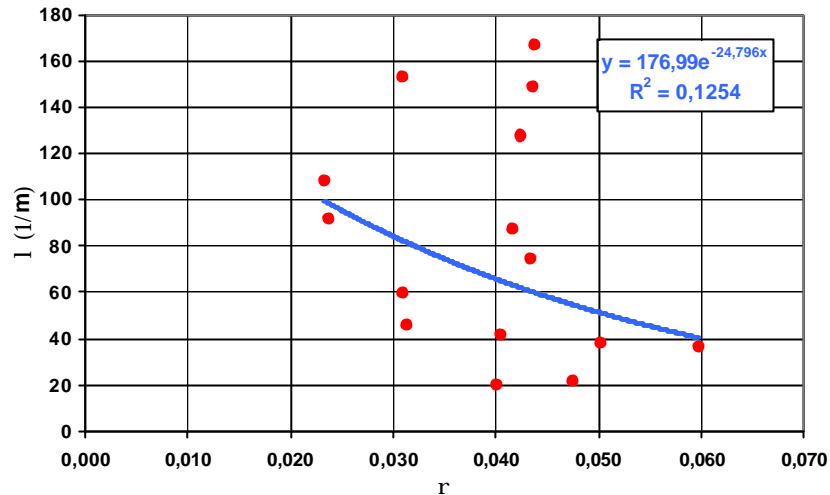


Figura 42:  $\lambda$  contra  $\rho$ , para líquidos e sólidos (todos os testes, exceto D.3 e 5.30/33/35).

O conjunto de testes não apresenta uma tendência. Tem uma correlação com  $R^2$  igual a 0,1254 um valor ruim, como já tinha sido observado nos teste de partículas sólidas.

No caso de injeção de dois tipos de partículas o uso da variável P não altera a ausência de tendência, nem a correlação como pode ser visto no gráfico da figura 43.

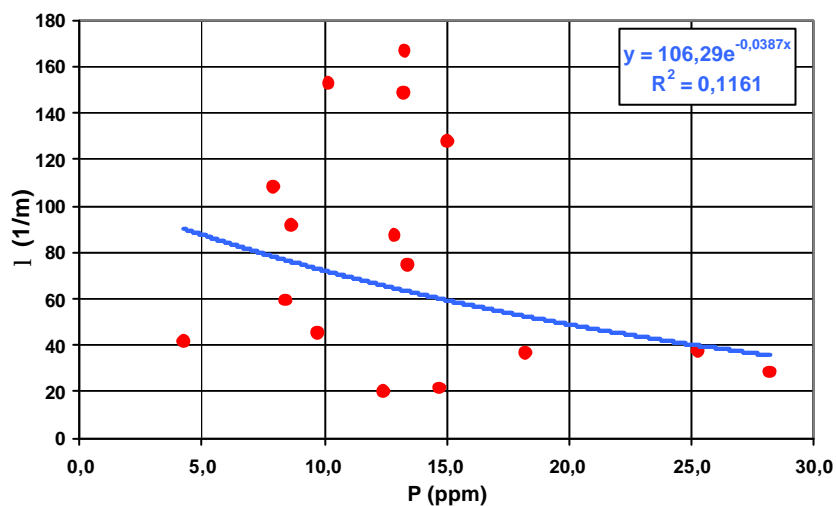


Figura 43:  $\lambda$  contra P, para líquidos e sólidos (todos os testes, exceto D.3 e 5.30/33/35).

Também os testes D.3 e 5.30/33/35 não foram utilizados porque também apresentam P altos demais, devido ao tamanho das partículas de líquido.

Numa análise inicial podemos dizer que  $\lambda$  é pouco afetado pelo tipo da partícula injetada, grandes concentrações de sólidos tendem a levar o parâmetro a se comportar como se não existissem partículas líquidas, pequenas concentrações de sólidos e grandes concentrações de líquidos tendem a levar o parâmetro a se apresentar mais semelhante aos resultados de líquidos.

#### 4.3.1.2 Coeficiente de Dano à Formação (b)

As análises do parâmetro  $\beta$  foram feitas da mesma forma que as do parâmetro  $\lambda$ .

Assim como para  $\lambda$  o teste D.3 apresenta valores de  $\rho$  anormalmente altos, que distorcem a análise devido ao seu alto diâmetro de gota de líquido, efeito semelhante ocorre no teste 5. 33. Na Figura 44 estão os resultados de  $\beta$  contra  $\rho$ . Não se obtém uma tendência como ocorre para partículas sólidas ou líquidas, ocorrendo inclusive a inversão da direção esperada da tendência do gráfico  $\beta$  contra  $\rho$ .

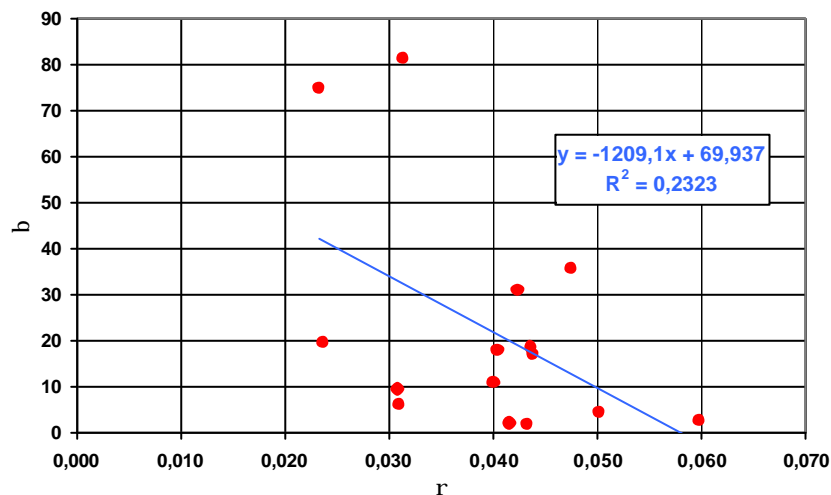


Figura 44:  $\beta$  contra  $\rho$ , para líquidos e sólidos (todos os testes, sem os testes D.3 e 5.33).

Os valores obtidos são intermediários entre os valores para partículas sólidas e para partículas líquidas. Considerando que as concentrações de sólidos para os testes do grupo 4 não são muito distintas, deveria ocorrer um dano muito maior

somente pelo efeito das partículas sólidas. Como isto não ocorre, pode-se afirmar que os danos causados por partículas sólidas e líquidas não são cumulativos.

Observa-se que o mecanismo de dano deve ser diferente para cada tipo de partícula. Como o dano é função do  $\sigma$  ou do volume precipitado e este é função da concentração de partículas tem-se:

$$\frac{s_S(T, X)}{s_l(T, X)} = \frac{c_S^0}{c_l^0} \quad (4.10)$$

Assim haveria uma relação entre os  $\sigma$  de sólidos e líquidos:

$$s_l = s_S \frac{c_l}{c_S} \quad (4.11)$$

Considerando-se que  $\beta$  para sólidos e líquidos é função dos dois tipos de  $\sigma$ :

$$b_{l+S}(s_l + s_S) = b_l(s_l) + b_S(s_S) \quad (4.12)$$

E substituindo 4.11 em 4.12 e simplificando obtém-se:

$$b_{l+S} = \frac{(b_l(c_l/c_S) + b_S)}{(c_l/c_S) + 1} \quad (4.13)$$

A equação 4.13 será utilizada para verificar se os valores obtidos nos testes com injeção de partículas sólidas e gota de óleo são coerentes com uma modelagem de efeitos distintos para cada tipo de partícula. Uma forma alternativa de obter a equação 4.13 é descrita no Apêndice E.

Teste	$b_{s+l}$	$C_s$	$C_o$	$C_o/C_s$	$b_{s+l}^*$	Erro	$b_s$
T4.15	31,0	55	300	5,5	33	4,8	154,7
T4.16	74,8	60	280	4,7	36	-52,4	$b_l$
T4.17	17,4	24	280	11,7	22	23,9	10,1
T4.18	6,6	22	250	11,4	22	232,5	
T4.19	19,1	24	280	11,7	22	12,6	
T4.D1	19,5	50	315	6,3	30	53,5	
T4.D2	9,6	50	280	5,6	32	232,3	
T4.D3	6,6	60	300	5,0	34	416,2	
Média	23	43	286	8	29	115	
T5.27	2,6	5	100	20	37	1316,5	$b_s$
T5.28	4,5	5	300	60	19	328,8	571,6
T5.29	18,0	5	500	100	16	-13,1	$b_l$
T5.30	14,8	5	50	10	61	312,1	10,1
T5.31	81,3	10	300	30	28	-65,3	
T5.32	10,9	10	300	30	28	159,5	
T5.33	11,6	10	300	30	28	142,4	
T5.34	35,7	10	300	30	28	-20,9	
T5.35	288,3	10	300	30	28	-90,2	
T5.36	2,0	10	300	30	28	1324,4	
T5.37	1,9	10	300	30	28	1361,3	
Média	43	8	277	36	30	432	

Tabela 1 Estimativa de  $\beta$  para misturas.

A tabela 1 mostra o resultado da estimativa dos valores de  $\beta$  para misturas. Foram empregados os valores de  $\beta$  para sólidos e líquidos de cada grupo para o cálculo da estimativa.

Os resultados individuais foram divergentes, porém, os valores médios foram da mesma ordem de grandeza. Na ausência de testes de misturas o cálculo acima poderia ser utilizado como estimativa do valor de  $\beta$  para misturas.

Este resultado indica que para estes testes o efeito das gotas de óleo é significativamente menor que o efeito dos sólidos injetados e na prática poderia ser desprezado.

#### 4.3.1.3 Permeabilidade do Reboco ( $k_c$ )

Assim como ocorreu com outros parâmetros,  $k_c$  apresenta um comportamento diferente em relação ao observado nos testes com injeção de sólidos. Em primeiro lugar, os valores de  $k_c$  são substancialmente altos e em segundo lugar não apresentam uma correlação forte com  $\rho$  ou  $P$ .

Assim como nas análises anteriores, o teste D.3 apresenta um grande afastamento dos demais testes do grupo 4.

Quando se retira o teste D.3 do gráfico porém não se observa nenhuma melhora da correlação entre  $k_c$  e  $\rho$ .

Como existem apenas três pontos no grupo 5, foi feito apenas o gráfico com todos os valores de  $k_c$ , os testes D.3, 5.35 inclusive. Pode-se observar que os dois pontos citados além de apresentarem valores discrepantes de  $\rho$  não apresentam valores de  $k_c$  semelhantes (figura 45).

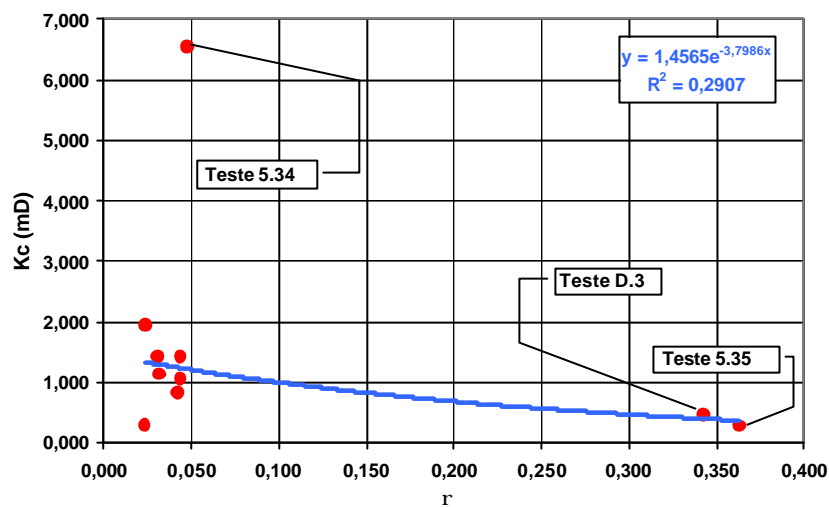


Figura 45:  $k_c$  e  $\rho$ , para sólidos e líquidos (todos os testes que atingiram o  $T_{tr}$  ( $\phi_c=12\%$ )).

Quando se retiram os dois testes com diâmetro de partículas líquidas muito grandes (figura 46), também não se obtém o mesmo resultado que foi obtido para a injeção de partículas sólidas, com uma tendência definida de queda do  $k_c$  em função do aumento de  $\rho$ . Ao invés disto se obtém uma tendência crescente. O ponto que cria esta distorção aparente é uma  $k_c$  de 6 mD ocorrida no teste 5.34. Porém mesmo quando se retira este ponto, os dados de  $k_c$  em função de  $\rho$  continuam a apresentar uma correlação com  $R^2$  baixo da ordem de 0,2.

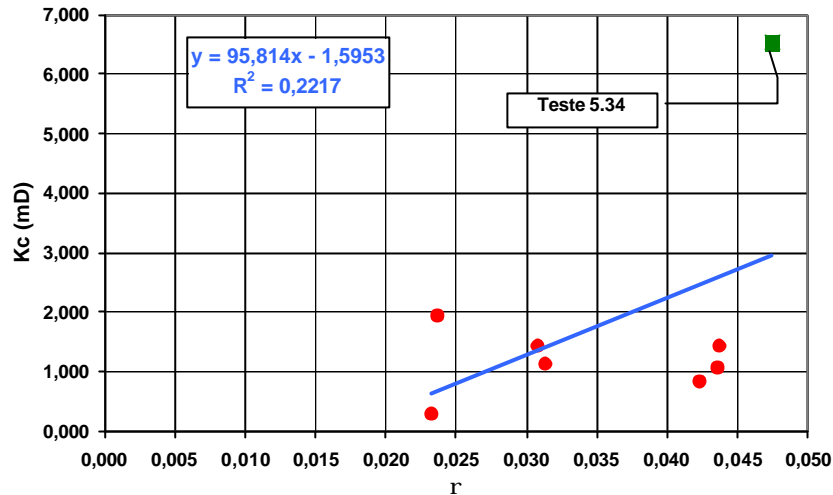


Figura 46:  $k_c$  e  $\rho$ , para sólidos e líquidos (todos os testes que atingiram o  $T_{tr}$ , excluídos D.3 e 5.35 ( $\phi_c=12\%$ )).

#### 4.3.1.4 Volume relativo depositado, $\alpha$

O volume relativo depositado também apresenta uma situação pouco definida nos testes com partículas líquidas e sólidas. Em três dos doze testes o valor de  $\alpha$  é superior à unidade o que fisicamente é impossível. Em vários outros testes ele apresenta valores acima de 50% o que já seria uma situação incomum. Fica evidente que no caso destes testes, assim como já tinha ocorrido com os testes com a injeção de partículas líquidas, a técnica empregada para o cálculo de  $\alpha$  não é adequada. A figura 47 ilustra o gráfico de  $\alpha$  em função  $\rho$ .

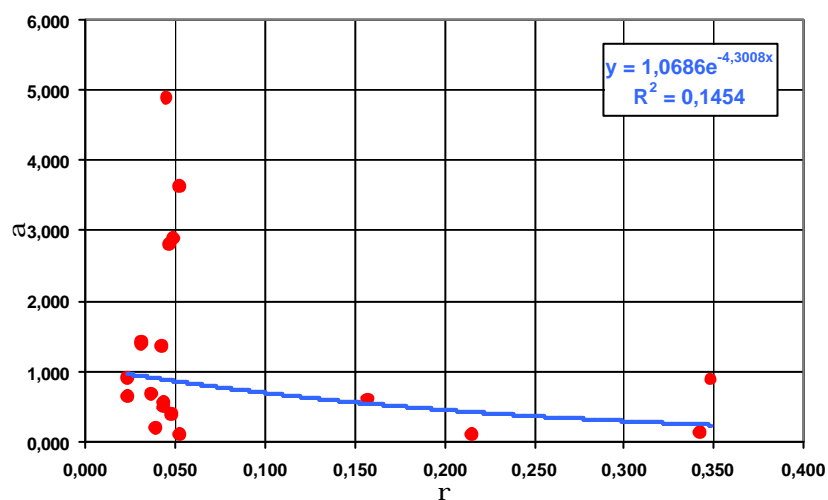


Figura 47:  $\alpha$  e  $\rho$ , para sólidos e líquidos todos os testes

Como para outras propriedades os testes D.3 e 5.30/33/35 apresentam valores extremos. Ocorrem também 3 valores acima da unidade e outros 5 valores acima de 50%, mostrando que esta metodologia não é adequada para o cálculo de  $\alpha$ .

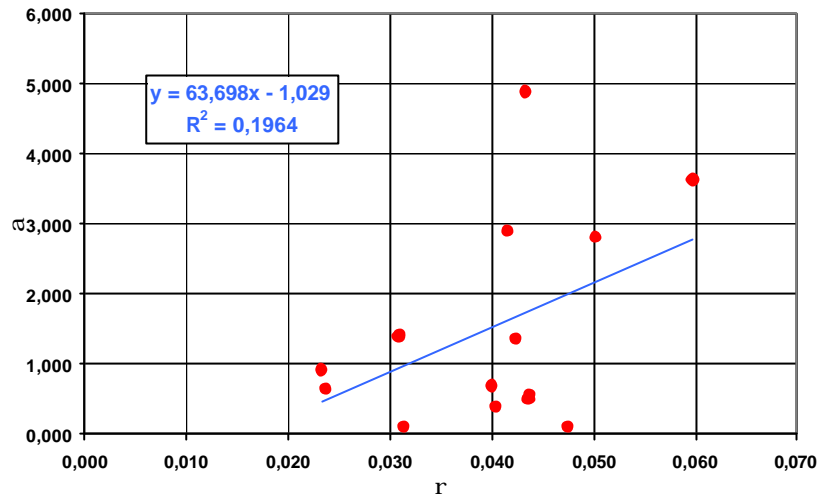


Figura 48:  $\alpha$  e  $\rho$ , para sólidos e líquidos (todos os testes, excluídos D.3 e 5.30/33/35).

Mesmo retirando estes testes não existe uma tendência para o parâmetro  $\alpha$  mas sim uma grande dispersão, provavelmente causada pela forma de cálculo que considera o último tempo reportado como o  $T_{tr}$ .

Os resultados gerais são os mesmos quando se utiliza a variável P, mostrando mais uma vez que não é possível obter resultados razoáveis com as considerações adotadas.

Assim como nos testes de sólidos, existe uma boa correlação entre  $\beta$  e  $\alpha$  (Figura 49). A questão, é se é possível considerar valores de  $\alpha$  acima da unidade, já que o valor teórico máximo de  $\alpha$  é 1 e assim os resultados acima não poderiam existir.

Os valores elevados de  $\alpha$  são possivelmente causados pela consideração que as partículas líquidas se precipitam quando na verdade estas continuam se movendo pela amostra.



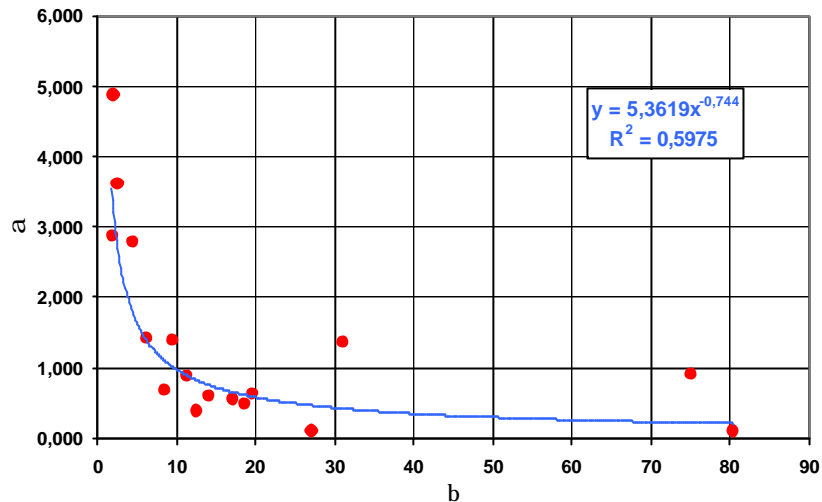


Figura 49: Correlação entre  $\beta$  e  $\alpha$  sem os testes extremos.

#### 4.4 Conclusões Sobre os Testes

Os estudos realizado neste capítulo levam às seguintes conclusões:

1 - O uso das técnicas descritas foi bem sucedido para os cálculos dos parâmetros  $\lambda$ ,  $\beta$ ,  $k_c$  e  $\alpha$  quando a perda de injetividade é função apenas da injeção de partículas sólidas.

2 - Em relação ao parâmetro  $\alpha$  não existe diferença significativa em considerar o cálculo da média dos  $\alpha$  de cada parte da amostra como um valor representativo do parâmetro.

3 - A boa correlação entre  $\alpha$  e  $\beta$  permite estimar o valor de  $\alpha$  mesmo que o teste não tenha uma boa definição do  $T_{tr}$  e resolver a determinação da filtração profunda sem o uso do método dos 3 pontos através da solução do sistema de equações 4.5 a 4.7. Essa correlação não foi ainda citada na literatura.

4 - Quando se utilizam partículas líquidas só foi possível determinar os parâmetros  $\lambda$  e  $\beta$ , pois os testes não atingiam o tempo de trânsito. A consideração que o último ponto do teste era o  $T_{tr}$  para calcular uma aproximação para  $\alpha$  não foi bem sucedida.

5 - Pelos resultados dos testes apenas para injeção de partículas líquidas pode-se perceber que as mesmas têm uma ação desprezível sobre o dano à

formação, e que os resultados globais do coeficiente de filtração ( $\lambda$ ) da mesma ordem de grandeza para qualquer tipo de partícula.

6 - Nestes testes pode-se verificar que as gotas de óleo tendem a se deslocar no meio poroso não ficando retidas na entrada da amostra como as partículas sólidas.

7 - Para testes com injeção dos dois tipos de partículas os resultados foram conflitantes e estão associados à consideração que as partículas sólidas e líquidas tem o mesmo comportamento.

8 - Os resultados indicam que o efeito das gotas de óleo é significativamente menor que o efeito dos sólidos injetados.

9 - Apenas  $\lambda$  é parâmetro menos afetado pelo tipo da partícula injetada, porém, quando se analisa misturas, grandes concentrações de sólidos tendem a levar o parâmetro a se comportar como se não existissem partículas líquidas, pequenas concentrações de sólidos e grandes concentrações de líquidos tendem a levar o parâmetro a se apresentar semelhante aos resultados de líquidos.

10 - Na ausência de testes de misturas uma estimativa do valor de  $\beta$  poderia ser obtido dos valores de testes só de partículas sólidas e só de partículas líquidas utilizando a equação 4.13.

Assim vamos propor uma nova análise para os testes de injeção de partículas sólidas e líquidas como se apenas as partículas sólidas estivessem presentes e comparar os valores e tendência encontrada com os calculados anteriormente.

## **5 Revisão do Modelo para os Testes com Partículas Sólidas e Líquidas.**

Como os resultados dos testes com partículas sólidas e líquidas apresentaram valores e tendências divergentes dos esperados é necessário rever o modelo utilizado.

O novo modelo adota como hipótese básica que a gota de óleo não deve ser considerada como partícula.

Em função de sua viscosidade baixa de 24,6 cP a 40 C°, o óleo do Campo de Tivela empregado nos testes não está se comportando como uma verdadeira partícula. Deve-se ressaltar, entretanto, que esta viscosidade não é incomum entre óleos com 26 a 28 API da Bacia de Campos, de modo que o óleo utilizado nos testes pode ser comparado com muitos outros óleos produzidos nas bacias marginais brasileiras e os resultados destes testes podem ser utilizados nestes campos.

Na prática o que ocorre com as gotas de óleo é que apenas uma fração delas fica retida no início do meio poroso. Apenas as gotas muito grandes em relação ao tamanho do poro poderiam ficar retidas. Como o tamanho médio do poro das amostras utilizados nestes testes varia entre 20 e 30  $\mu\text{m}$ , seriam necessárias gotas muito grandes (bem maiores que as empregadas nestes testes), para que as forças capilares fossem maiores que as forças de pressão e as gotas de óleo ficassem retidas.

As partículas líquidas começam a ser retidas após o início da formação do reboco. Este fato é confirmado nos testes com fluxo de gotas de óleo onde não ocorreu a formação de reboco.

O fato de as partículas líquidas terem um efeito reduzido na perda de injetividade pode ser encontrado na literatura (Nasr-El-Din (1998)), onde tentativas de restaurar a injetividade de poços de descarte de água através da injeção de solventes teve sucesso reduzido. Os mesmos autores realizaram uma série de testes de fluxo em meio poroso, para determinar qual seria a melhor formulação de

ácido (HCl), para a remoção das partículas sólidas que no caso eram em grande parte formadas por FeS. Somente após a acidificação é que houve uma melhora da injetividade das amostras analisados.

### **5.1 Metodologia**

Nos cálculos iniciais a concentração total de partículas foi calculada pela equação 4.8. Agora, se não estamos considerando as gotas de óleo como partículas obtêm-se:

$$C_t = C_s \quad (5.1)$$

Da mesma forma o diâmetro da partícula era calculado como uma média ponderada do diâmetro das partículas sólidas e das gotas de óleo, não considerando estas como partículas obtêm-se:

$$D_p = \frac{D_{ps} \times c_s}{c_s} \quad (5.2)$$

A partir destas novas diretrizes foram refeitos os cálculos para as variáveis P e  $\rho$  que podem ser observados na Tabela 2.

Considerando como partículas apenas os sólidos foram recalculadas todas as propriedades dos testes nas tabelas F.19 a F.22 do Apêndice F.

De posse dos novos dados foi iniciada nova análise dos parâmetros.

Teste	K	Cs	Ds	fc	r	R
T4.15	1059	55	7	26,9	0,056	3,07
T4.16	1258	60	4	26,9	0,029	1,75
T4.17	1301	24	7	26,9	0,050	1,21
T4.18	1170	22	5	26,9	0,038	0,83
T4.19	1309	24	7	26,9	0,050	1,20
T4.D1	1397	50	6	26,9	0,042	2,08
T4.D2	1666	50	4	26,9	0,025	1,27
T4.D3	997	60	10	26,9	0,082	4,93
Média	1342,1	46	6,75	26,9	0,0498	2,3711
T5.27	588	5	6	18,0	0,060	18,22
T5.28	657	5	11	18,0	0,091	46,01
T5.29	1498	5	11	22,0	0,071	7,48
T5.30	1181	5	11	18,0	0,102	10,67
T5.31	714	10	16	22,0	0,079	24,58
T5.32	1293	10	6	22,0	0,040	12,40
T5.33	835	10	6	22,0	0,035	10,77
T5.34	984	10	16	22,0	0,120	37,21
T5.35	454	10	16	22,0	0,119	36,78
T5.36	656	10	6	22,0	0,042	12,87
T5.37	1311	10	6	22,0	0,043	13,41
Média	925	8,2	10,1	20,9	0,073	20,9
Média Total	1.070	32,1	7,8	25,3	0,054	8,44

Tabela 2 Dados dos testes com partículas sólidas e misturas de partículas, variáveis  $\rho$  e P.

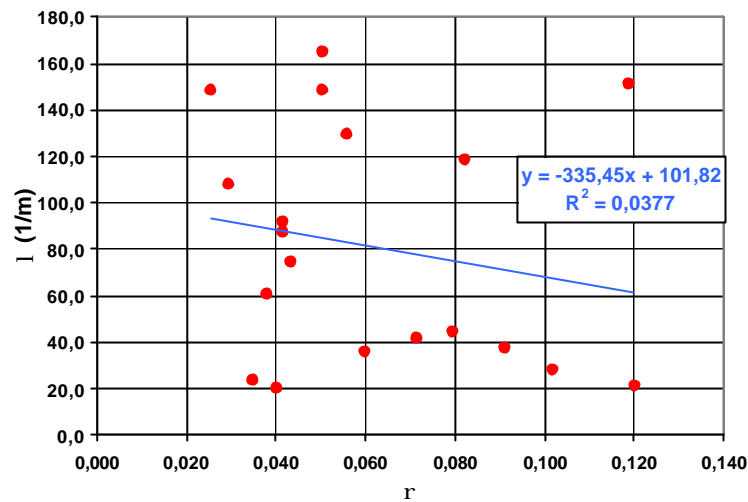
## 5.2 Análise dos Parâmetros

A análise dos parâmetros foi feita da mesma forma, analisando o comportamento deles em relação às variáveis P e  $\rho$ .

### 5.2.1 Coeficiente de Filtração

Observando as tabelas F.19 e F.21 pode-se ver que os valores de  $\lambda$  não variaram significativamente, ao contrario do que foi suposto no capítulo 4,  $\lambda$  não variava sensivelmente com o tipo de partícula, sendo uma basicamente propriedade do meio poroso (praticamente independente do tipo de partícula). Os resultados distintos dos dois grupos de testes de misturas são devidos às diferenças entre os amostras empregadas.

Os resultados mostrados nos gráficos (figuras 50 e 51) são muito próximos aos calculados anteriormente.



. Figura 50:  $\lambda$  em função de  $\rho$ , para sólidos e líquidos (todos os testes).

O conjunto de testes apresenta baixa correlação (mesmo  $R^2$ ) apresentada pela análise anterior, porém com tendência decrescente, como a que ocorre nos testes com injeção só de partículas sólidas.

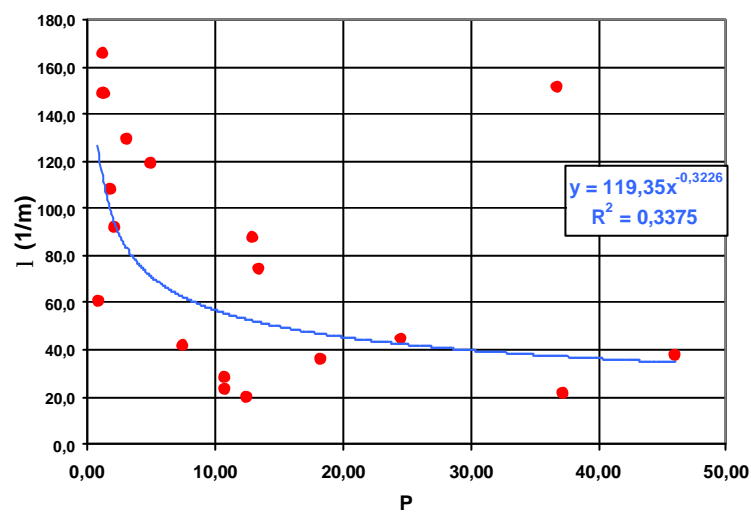


Figura 51:  $\lambda$  em função de P, para sólidos e líquidos ( todos os testes).

O uso da variável P em vez de  $\rho$  aumenta a correlação dos pontos em relação à análise anterior. Porém, sua tendência é diferente dos testes onde só houve injeção de partículas sólidas, a explicação para isto está no intervalo de valores da variável P. Na Figura 28 que analisa as somente as partículas sólidas, pode-se

observar que o intervalo de valores para P está entre 0,0 e 3,0 o que não permite a observação de uma tendência clara. Como o gráfico 50 têm um intervalo de valores muito maior de 0,0 a 60,0 ele permite a observação da tendência do comportamento do parâmetro.

Teste	l 1 - 2 (1/m)	l (1/m)	l 1 - 2 (1/m)	l (1/m)	Dl 1 - 2 (%)	Dl (%)
T4.15	129,5	123,3	127,9	122,1	1,29	1,01
T4.16	108,0	142,3	108,5	142,3	-0,46	0,00
T4.17	165,5	129,7	167,0	130,3	-0,90	-0,51
T4.18	60,8	51,5	59,5	50,7	2,10	1,6447
T4.19	148,8	115,8	149,0	116,0	-0,17	-0,14
T4.D1	92,1	90,5	91,8	90,4	0,27	0,11
T4.D2	148,5	117,0	153,0	121,7	-2,94	-3,84
T4.D3		119,0	111,0	118,0		0,85
Média	121,86	111,14	120,96	111,43	-0,11	-0,11
T5.27	36,3	33,8	36,8	34,0	-1,36	-0,49
T5.28	37,9	37,0	37,9	37,1	-0,13	-0,18
T5.29	41,8	30,7	41,8	30,7	0,00	0,00
T5.30	28,5	26,2	28,7	26,3	-0,52	-0,25
T5.31	45,0	42,4	45,7	43,4	-1,53	-2,46
T5.32	20,3	19,4	20,3	19,4	0,00	0,00
T5.33	23,7	23,0	22,1	22,0	7,00	4,54
T5.34	21,7	20,8	21,7	20,8	-0,05	-0,10
T5.35	151,5	116,7	152,5	117,3	-0,66	-0,57
T5.36	87,5	72,0	87,5	72,0	0,00	0,00
T5.37	74,8	69,2	74,8	68,8	0,00	0,48
Média	51,7	44,6	51,78	44,71	0,25	0,09
Média Total	79,0	72,6	80,9	72,8	0,11	0,01

Tabela 3 Comparação de valores de  $\lambda$  obtidos pelos dos métodos de cálculo.

A conclusão que se pode tirar da nova análise é que a inclusão ou não das partículas líquidas afeta pouco o valor absoluto do cálculo de  $\lambda$ . As diferenças médias são de apenas 0,1%. Somente um único teste apresentou um valor maior, o teste 5.33. Mesmo assim com diferença menor que 5%. Este teste é que apresenta maior tamanho de gota de óleo o que pode ter algum efeito no cálculo (ainda que pequeno).

Portanto se necessitarmos apenas do valor de lambda para um cálculo ou estudo, para condições análogas às destes teste, pode-se utilizar o valor calculado com injeção de partículas sólidas, para injeção de partículas líquidos ou para injeção de misturas com erro aceitável.

Recomenda-se também que se use para as correlações a variável P que apresenta resultados muito melhores que a variável  $\rho$ .

### 5.2.2 Coeficiente de Dano à Formação

Observando as tabelas F.19 e F.21 verifica-se que os valores de  $\beta$  mudam com o novo método de cálculo. Antes, todos os testes tinham valores baixos, mais próximos dos valores encontrados para líquidos. Pelos novos cálculos tem-se valores próximos dos registrados em sólidos.

Estes valores fazem sentido, pois a maioria dos testes com partículas sólidas e líquidas apresenta tempo de transição, o que significa formação de reboco interno, o que era incompatível com baixos valores de  $\beta$ .

Nas análises anteriores o teste 5.33 apresentava distorção pelo seu elevado valor de  $\rho$ . Agora obtém-se valores distorcidos nos testes 5.31 e 5.35, pois os mesmos apresentam um valor de  $\beta$  acima do normal. Verificando os valores na análise anterior, vê-se que não há discrepância, pois todos os valores de  $\beta$  aumentaram numa proporção semelhante.

A relação entre os pontos é melhor, com uma tendência crescente, semelhante ao ocorrido nos testes com sólidos.

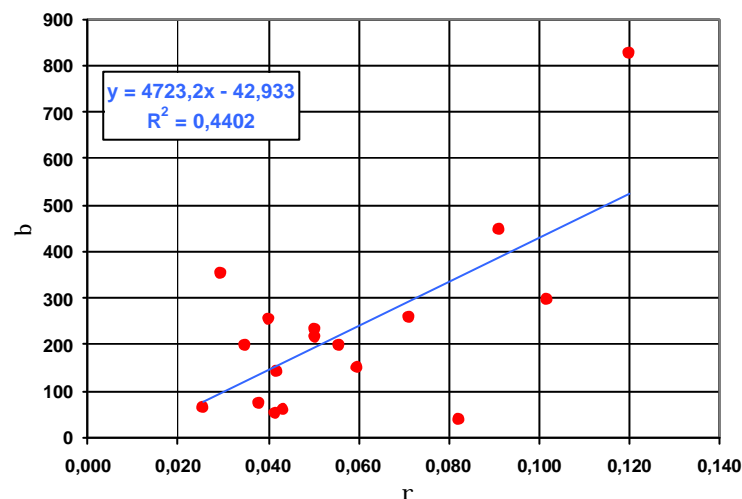


Figura 52:  $\beta$  em função de  $\rho$ , para sólidos e líquidos (todos os testes menos o teste 5.31 e 5.35).

Quando se analisa o gráfico com todos os testes percebe-se uma tendência crescente de  $\beta$  contra  $\rho$  semelhante à ocorrida com os testes só para sólidos. Como foi comentado na seção 4.1.1.2., esta tendência é a esperada para o parâmetro  $\beta$ .



Além disto a nova correlação apesar de não muito forte é mais robusta que a obtida considerando as partículas líquidas.

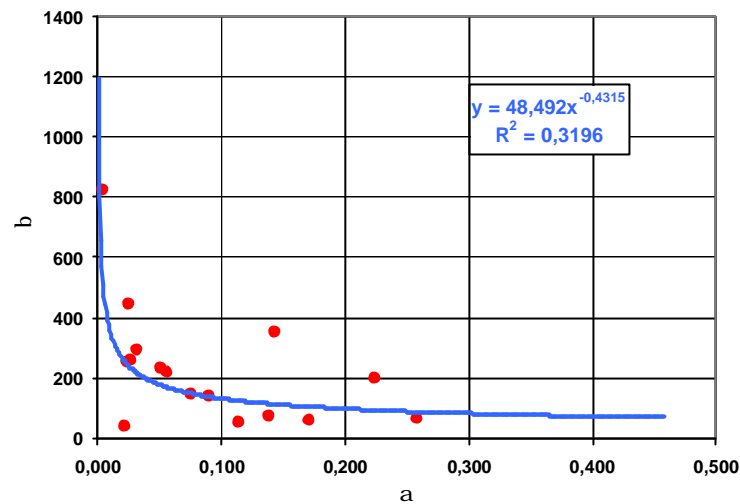


Figura 53:  $\beta$  em função de  $\alpha$ , para sólidos + líquidos, Todos os testes menos o teste 5.31 e 5.35.

Assim como para partículas sólidas ocorre uma boa correlação entre  $\beta$  e  $\alpha$ , indicando a forte relação entre o tipo de partícula sólida injetada e o comportamento da perda de injetividade. Muitas partículas pequenas geram grandes volumes depositados, com baixo dano. Um pequeno número de grandes partículas gera altos danos, com baixo volume precipitado. Em comparação com as análises anteriores esta apresenta um bom ajuste, um limite para  $\alpha$  em torno de 0,5.

Comparando-se os resultados para as duas formas de análise observa-se que ocorrem grandes incrementos nos valores de  $\beta$ , principalmente no grupo 5. A diferença entre as médias de  $\beta$  foi observada nos testes com partículas sólidas onde os valores do grupo 4 foram menores que os do grupo 5. Essas diferenças ocorrem em função das características das rochas. Entretanto, os valores calculados na segunda análise estão enquadrados no intervalo dos valores de  $\beta$  que ocorrem para testes somente com partículas sólidas, todos os valores são mostrados na Tabela 4.

Test	b1-2	b	b1-2	b	Db1-2 (%)	Db (%)
T4.15	199,9	200,2	31,0	31,0	545	546
T4.16	355,0	354,0	75,0	74,8	373	373
T4.17	217,8	222,2	17,0	17,4	1179	1180
T4.18	75,2	81,1	6,1	6,6	1137	1138
T4.19	234,5	241,7	18,5	19,1	1168	1165
T4.D1	142,2	142,2	19,5	19,5	630	630
T4.D2	64,4	65,3	9,4	9,6	585	578
T4.D3		39,4		6,6		495
Média	184,12	168,26	25,206	23,075	803	763
T5.27	150,0	159,0	2,5	2,6	6022	6015
T5.28	447,5	457,3	4,4	4,5	10070	10063
T5.29	260,0	376,7	12,4	18,0	2005	1993
T5.30	297,5	313,3	14,1	14,8	2017	2012
T5.31	2542,5	2603,3	80,3	81,3	3066	3103
T5.32	256,5	334,3	8,3	10,9	2990	2977
T5.33	199,0	262,0	11,2	11,6	1677	2152
T5.34	827,5	1101,7	27,0	35,7	2965	2989
T5.35	8500,0	9066,7	270,0	288,3	3048	3045
T5.36	54,0	61,3	1,7	2,0	3012	2998
T5.37	59,3	59,8	1,9	1,9	3002	3000
Média	1236	1345	39,43	42,87	3.625	3.668
Média Total	826,8	849,6	33,9	34,5	2.527	2.445

Tabela 4 Comparação de valores de  $\beta$  obtidos pelos dois métodos de cálculo.

Em função dos bons resultados da correlação de  $\beta$  e  $\alpha$ , caso o teste não alcance o tempo de trânsito, pode-se estimar, por este processo,  $\alpha$  a partir do valor calculado de  $\beta$ , bem como determinar a solução da filtração profunda através do sistema de equações 4.5 a 4.7.

Considerando-se apenas partículas sólidas  $\beta_s$  e os resultados médios dos testes apenas com gotas de óleo,  $\beta_l$ , calcula-se o possível resultado da mistura  $\beta_{s+l}^*$  utilizando a equação 4.13, comparando-se a seguir com o resultado original  $\beta_{s+l}$ , que é o calculado considerando os dois tipos de partículas. Os resultados estão na Tabela 5.

Assim como no item 4.3.1.2 (Tabela 1) os valores apresentam um erro apreciável, porém, com a mesma ordem de grandeza. Confirmando assim que se pode fazer uma estimativa do valor de um teste de mistura de partículas, como primeira aproximação, utilizando os valores de testes de injeção de partículas sólidas e testes de injeção de partículas líquidas.

Teste	b s	Co/Cs	b s+l*	b s+l	Erro (%)	b l
T4.15	200,2	5,5	40	31,0	29	10,5
T4.16	353,97	4,7	71	74,8	-5	
T4.17	222,17	11,7	27	17,4	57	
T4.18	81,133	11,4	16	6,6	147	
T4.19	241,67	11,7	29	19,1	51	
T4.D1	142,23	6,3	29	19,5	46	
T4.D2	65,333	5,6	19	9,6	95	
T4.D3	39,4	5,0	15	6,6	131	
Média	168	8	31	23	69	
T5.27	159	60,0	13	2,6	397	
T5.28	457,33	100,0	15	4,5	232	
T5.29	376,67	20,0	28	18,0	55	
T5.30	313,33	20,0	25	14,8	68	
T5.31	2603,3	30,0	94	81,3	16	
T5.32	334,33	30,0	21	10,9	93	
T5.33	262	30,0	19	11,6	60	
T5.34	1101,7	30,0	46	35,7	28	
T5.35	9066,7	30,0	303	288,3	5	
T5.36	61,333	30,0	12	2,0	513	
T5.37	59,833	30,0	12	1,9	526	
Média	1345	37	53	43	181	

Tabela 5: Estimativa para  $\beta$  para injeção de misturas.

### 5.2.3 Permeabilidade do Reboco (kc)

A permeabilidade do reboco foi reanalisada considerando apenas a porosidade do reboco de 25% (que é a mais provável).

Assim como outros parâmetros,  $k_c$  teve seus valores aproximando-se dos testes de partículas sólidas. Também passou a apresentar uma correlação decrescente com o aumento de  $\rho$ , assim como nos testes de partículas sólidas.

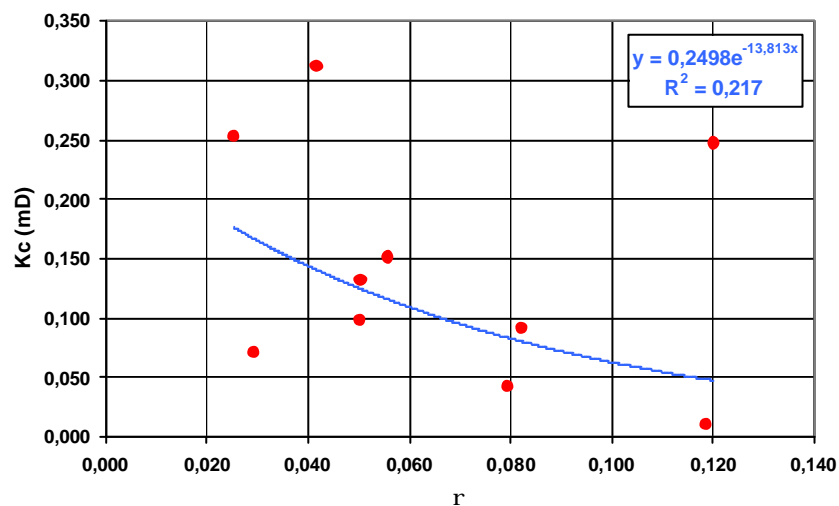


Figura 54:  $k_c$  em função de  $\rho$ , para sólidos e líquidos, para todos os testes que atingiram o  $T_{tr}$ .

Quando se observam todos os testes válidos percebe-se que a tendência observada para sólidos é mais suave (Gráfico 31). O motivo é o pequeno intervalo de valores dos testes. Quando observa-se os gráficos com todos os testes com partículas sólidas e todos com sólidos e líquidos pode-se ver a relação entre os parâmetros.

Teste	$k_{c2}$ (mD)	$k_{c1}$ (mD)	D $k_c$ (%)
T4.15	0,151	0,833	-82
T4.16	0,071	0,285	-75
T4.17	0,132	1,429	-91
T4.18			
T4.19	0,099	1,066	-91
T4.D1	0,312	1,942	-84
T4.D2	0,253	1,429	-82
T4.D3	0,092	0,469	-80
Média	0,1586	1,0647	-84
T5.27			
T5.28			
T5.29			
T5.30			
T5.31	0,043	1,126	-96
T5.32		-	
T5.33		-	
T5.34	0,247	6,536	-96
T5.35	0,011	0,282	-96
T5.36			
T5.37			
Média	0,1451	1,9155	-96
Média Total	0,156	1,374	-86

Tabela 6 Comparação de valores de  $k_c$  obtidos pelos dois métodos de cálculo,  $k_{c1}$  para método do capítulo 4 e  $k_{c2}$  para novo método.

O efeito final de considerar apenas as partículas sólidas é uma redução sistemática da permeabilidade do reboco. Esta redução é praticamente constante para todos os testes analisados. Na prática os valores agora obtidos são semelhantes ao obtidos nos testes só com partículas sólidas.

Como conclusão, considera-se que apenas o reboco formado pelos sólidos causa redução da permeabilidade.

### 5.2.4 Volume Relativo Depositado

Os resultados para  $\alpha$  são muito semelhantes aos obtidos para partículas sólidas (Figura 55). Apresentando uma boa correlação com  $\rho$ , ao contrário do que ocorre quando se considera todas as partículas como participantes da precipitação. Também os intervalos de valores de  $\alpha$  são sempre menores que a unidade, eliminando os números obtidos na análise anterior.

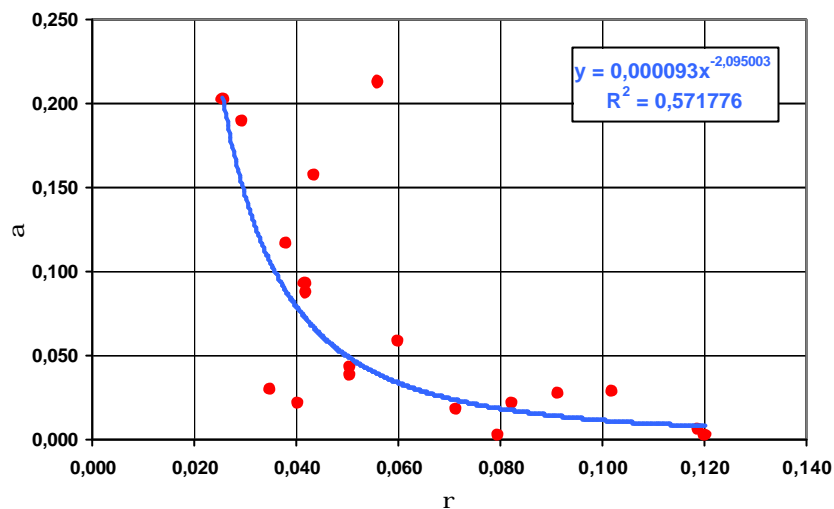


Figura 55:  $\alpha$  em função de  $\rho$ , para sólidos e líquidos, todos os testes que atingiram o  $T_{tr}$ .

Teste	$a_2$	$a_1$	Da (%)
T4.15	0,223	1,423	-84
T4.16	0,142	0,693	-79
T4.17	0,056	0,715	-92
T4.18	0,138	1,670	-92
T4.19	0,050	0,632	-92
T4.D1	0,089	0,651	-86
T4.D2	0,257	1,751	-85
T4.D3	0,021	0,125	-83
Média	0,1222	0,9575	-87
T5.27	0,075	4,6163	-98,3753
T5.28	0,025	2,4795	-99,0119
T5.29	0,026	0,5345	-95,2292
T5.30	0,032	0,6648	-95,2614
T5.31	0,003	0,110	-96,9094
T5.32	0,023	0,7193	-96,7746
T5.33	0,031	0,8994	-96,5475
T5.34	0,004	0,1107	-96,7931
T5.35	0,008	0,2637	-96,7956
T5.36	0,113	3,5134	-96,7738
T5.37	0,171	5,3123	-96,7838
Média	0,046	1,7476	-96,8414

Tabela 7 Comparação de valores de  $\alpha$  obtidos pelos dois métodos de cálculo,  $\alpha_1$  para o original e  $\alpha_2$  para o novo método.

Assim como  $k_c$  os valores de  $\alpha$  apresentam uma variação praticamente linear dos seus valores. Conforme exposto na seção 4.1.1.1, na prática, apenas as partículas sólidas se precipitam. As gotas de óleo não se depositam, embora um certo número de gotas de óleo em um determinado tempo esteja dentro da amostra, mas como elas são móveis interferem muito pouco na perda de injetividade não contribuindo para a formação de reboco, embora tenham efeito na velocidade do fluxo.

### **5.3 Resultados da Revisão do Modelo**

Os resultados indicam que o parâmetro menos sensível ao tipo de partícula injetada é o  $\lambda$ . Este parâmetro praticamente não sofre alteração em seus valores quando se utiliza um método ou outro.

O parâmetro  $\beta$  foi aquele que teve a variação mais significativa com a alteração de método. As diferenças entre os dois grupos de testes são devidas à concentração de partículas. No grupo 4 a concentração de partículas sólidas é alta, semelhante aos dos testes de sólidos, enquanto nos testes do grupo 5 ela é baixa. Considerar que somente as partículas sólidas causam dano à formação pode ser uma boa aproximação para os testes do grupo 4, onde estas são predominantes, tanto que os valores médios calculados pelo segundo método são semelhantes aos calculados apenas para partículas sólidas. Por outro lado, nos testes do grupo 5, não se pode desprezar completamente os efeitos das partículas líquidas, pelo menos com as altas concentrações de óleo empregadas nos testes. Ao contrário dos testes do grupo 4, os resultados do grupo 5 têm divergências maiores e valores mais altos de  $\beta$  quando comparados com os mesmos arenitos do grupo 5B.

Para incorporar os efeitos das partículas líquidas, pode-se utilizar os valores estimado do teste de injeção de partículas sólidas e um teste de injeção de partículas líquidas e fazer uma estimativa do valor de um teste de mistura de partículas através da equação 4.13 para  $\beta$ .

Por outro lado o parâmetro  $k_c$  apresentou uma variação percentual significativa, com pequena variação do valor absoluto. Pode-se afirmar que dificilmente ocorrerá uma  $k_c$  maior que 1 mD quando só se considera partículas

sólidas e 5 mD para qualquer tipo de partícula injetada nestes testes. Assim, pode-se não calcular o valor de  $k_c$  e se necessário adotar uma série de valores para se ter várias estimativas de declínio final de injetividade.

Para testes com partículas sólidas um intervalo aceitável é entre 0,05 e 0,50 mD e se for considerada a injeção de partículas líquidas o intervalo fica entre 0,50 e 2,00 mD. Estes valores são válidos para partículas entre 1 e 15  $\mu\text{m}$  de diâmetro e para permeabilidades da formação até 50 mD. Pelas análises feitas, para os valores normais dos testes e para uso em campos de petróleo com injeção de água estes limites são aceitáveis.

Na figura 56 é mostrada uma simulação dos resultados de perda de injetividade em função de  $k_c$  para partículas sólidas a partir de um dos testes do grupo 4. Foram estimados três possíveis valores dentro do intervalo para estas partículas e comparado com os resultados da correlação, mostrando que esta simplificação é aceitável caso não seja possível calcular o  $k_c$ .

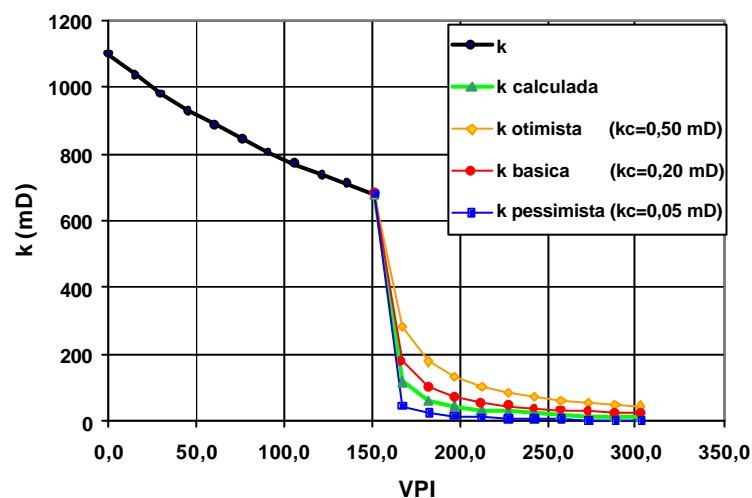


Figura 56:  $k$  em função de VPI, simulação para o teste 4.08 para sólidos.

Porém, como  $k_c$  tem grande influência na injetividade final, pode ser necessário considerar as diferenças entre os valores dos dois tipos de teste.

Em relação à  $\alpha$  acredita-se que o segundo método representa melhor a deposição de partículas no meio poroso. Pelo menos para óleos de baixa viscosidade, onde o óleo não pode ser tratado como uma partícula que cause a formação de um reboco permanente. As gotas de óleo causam um dano profundo ao se espalhar pela amostra como um todo (não ficando concentradas na entrada

como os sólidos). Este fato pode ser explicado pelo bloqueio da seção transversal de entrada principalmente através de partículas sólidas. Partículas líquidas têm retenção independentemente das sólidas e retornam ao fluxo quando a saturação de óleo na entrada amostra excede a saturação de óleo residual.

Como sugestão é necessário fazer um novo tipo de teste com um pós-fluxo de água sem sólidos e gotas de óleo para verificar se o dano criado pelas gotas de óleo pode ser removido.

A boa correlação entre  $\alpha$  e  $\beta$  permite estimar o valor de  $\alpha$  mesmo que o teste não tenha uma boa definição do  $T_{tr}$  e resolver a determinação da filtração profunda sem o uso do método dos 3 pontos através da solução de um sistema de equações. As duas primeiras são as equações 4.5 e 4.6 que relacionam respectivamente  $\alpha$  e  $\lambda$  e  $\beta$  e  $\lambda$ , a terceira equação que relaciona  $\beta$  e  $\alpha$  pode ser obtida de uma correlação.

Na figura 57 é apresentada a correlação para o caso em que considera-se para todos os testes apenas as partículas sólidas.

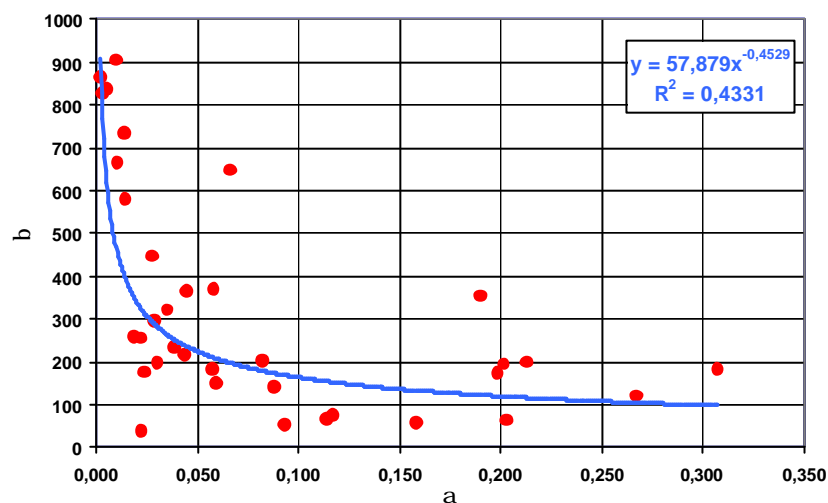


Figura 57:  $\beta$  em função de  $\alpha$ , comparação da análise considerando partículas sólidas e líquidas e só partículas sólidas.

Para misturas a equação 5.3 que pode ser retirada do gráfico e junto com as equações 4.5 e 4.6 podem determinar os parâmetros  $\alpha$ ,  $\lambda$  e  $\beta$ .

$$\beta = 57,879\alpha^{-0,4628} \quad (5.3)$$



## 6 Cálculo dos Parâmetros

O objetivo da análise foi determinar como calcular os parâmetros básicos da perda de injetividade sem a necessidade de testes de fluxo em meio poroso partindo apenas das seguintes informações iniciais:

- ◆  $k$  permeabilidade da amostra.
- ◆  $\phi$  Porosidade da amostra.
- ◆ Relação entre raios de poro e partículas injetadas, sendo esta dependente de:
  - $D_s$  (diâmetro médio das partículas sólidas),
  - $D_l$  (diâmetro médio das partículas líquidas),
  - $C_s$  (concentração das partículas sólidas),
  - $C_l$  (concentração das partículas líquidas).
- ◆ É necessário também estimar o  $\phi_c$  (porosidade do reboco).

A partir destes dados iniciais calcula-se os parâmetros  $\alpha$   $\beta$   $\lambda$  e  $k_c$  através de correlações e com os parâmetros pode-se determinar:

- $m$ , inclinação da reta na fase da perda de injetividade por filtração profunda.
- $m_c$ , inclinação da reta na fase da perda de injetividade por formação de reboco.
- $T_{tr}$ , tempo de transição entre as duas fases.

Com isto seria possível determinar as curvas de impedância e perda de injetividade para um reservatório que não tenha um teste de fluxo em meio poroso.

Para isto seria necessário determinar a porosidade do reboco ( $\phi_c$ ), que poderia ser ajustada em função do teste a ser analisado ou estimada.

Inicialmente previa-se que seria possível criar uma única correlação para todos os tipos de partículas envolvidas na perda de injetividade, porém, como foi comprovado nos capítulos 3,4 e 5, não foi possível criar uma única correlação. Foram criados sete conjuntos de correlações, sendo que 3 deles têm duas variantes

totalizando 10 possibilidades. A seguir verificam-se todos os possíveis métodos para determinar a perda de injetividade.

### 6.1 Injeção de Partículas Sólidas

Para injeção de água com partículas sólidas obteve-se um conjunto de correlações para os parâmetros estudados com uma variação. Os mesmos serão denominados método 2 e método 2B.

O método 2 considera apenas os testes com partículas sólidas e utiliza nas correlações (obtidas no capítulo 4) para  $\lambda$ ,  $\beta$ ,  $k_c$  e  $\alpha$  para a variável  $\rho$ . Os valores de entrada para o cálculo perda de permeabilidade deste amostra são  $k_c$ ,  $\phi_c$ ,  $D_s$  e  $C_s$ .

No método 2B o parâmetro  $\lambda$  considera a correlação para a variável  $P$  e não para  $\rho$ , sendo os demais correlações são iguais ao método 2, os valores entrada para o cálculo também são os mesmos.

Na figura 58 são mostrados os resultados das estimativas de perda de permeabilidade pelos dois métodos (curvas laranja e preta) para o teste 5.7, bem como o teste original (a curva original de perda de injetividade da Univ. Delft, curva vermelha). Após o cálculo dos parâmetros  $\lambda$ ,  $\beta$ ,  $k_c$  e  $\alpha$ , são calculadas as inclinações  $m$  da filtração profunda e  $m_c$  da formação do reboco e também o  $T_{tr}$ .

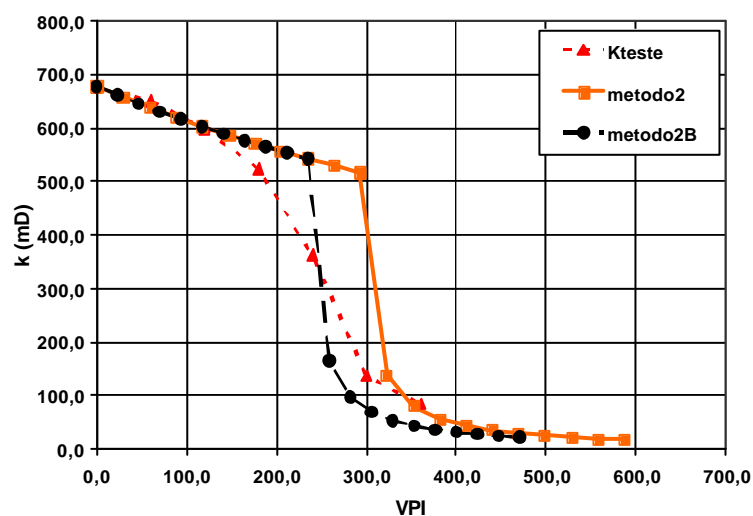


Figura 58: Ajuste da permeabilidade do teste 5.7 para os dois métodos de partículas sólidas para um  $\phi_c$  de 25%.

Utilizando as equações 3.8 e 3.9 é calculada a perda de injetividade antes do  $T_{tr}$  e após este utiliza-se a equação 3.13.

Na figura 59 abaixo são mostradas as curvas de impedância simuladas e a real curva do teste, as curvas de impedância são a inversão da curva de permeabilidade da figura 58.

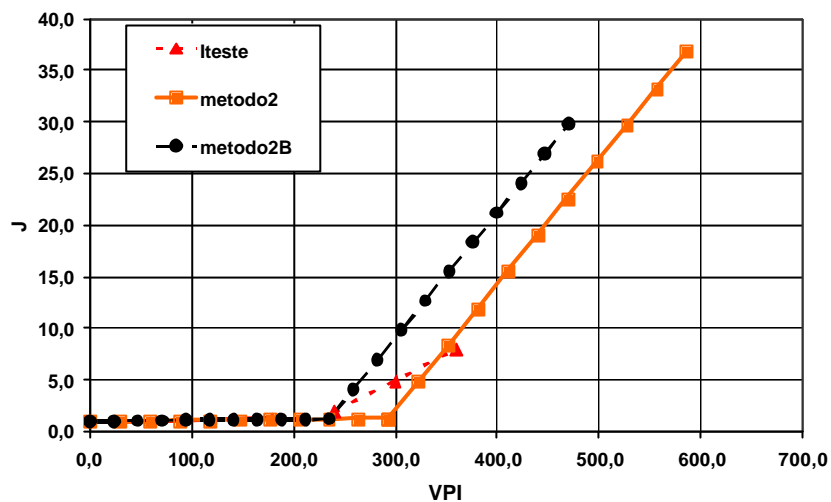


Figura 59: Ajuste da impedância do teste 5.7 para os dois métodos de partículas sólidas  $\phi_c$  de 25%..

O ajuste final depende da porosidade do reboco ( $\phi_c$ ), porém, pode-se ver que tanto a fase inicial quanto a final estão bem representadas na figura 58, mas não a região de transição entre a filtração profunda e a formação do reboco. Isto se deve ao fato de que o modelo teórico considera a existência de um ponto de transição definido para toda a amostra. Na realidade ocorrem bloqueios parciais pela formação de reboco, estes bloqueios que vão reduzindo a permeabilidade de maneira mais suave.

Na figura 59 percebe-se que o método 2B ajusta bem o tempo de transição, porém, a inclinação da reta  $m_c$  não é bem ajustada. A inclinação da reta é dependente de  $\phi_c$ , o valor adotado foi o máximo utilizado na análise inicial, 25%. Para ajustar o valor de  $m_c$  seria necessário um  $\phi_c$  de 60%, que resultaria num ajuste bom para o método 2B tanto para a permeabilidade (figura 60) quanto para a impedância.

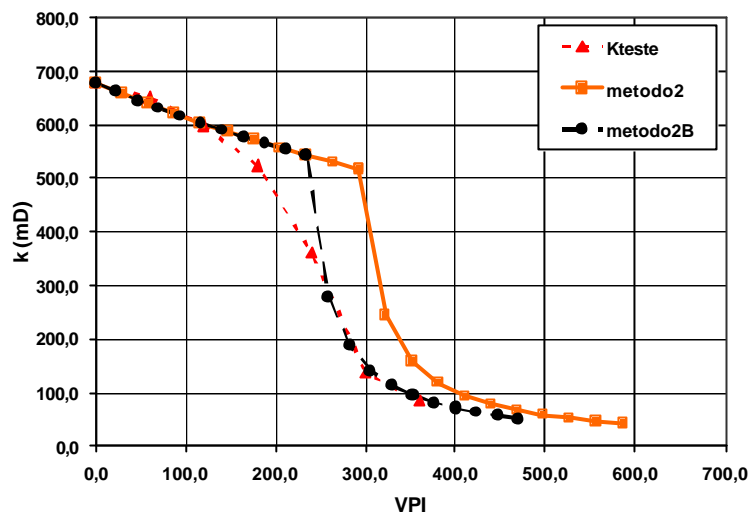


Figura 60: Ajuste da permeabilidade do teste 5.7 para os dois métodos de partículas sólidas para um  $\phi_c$  de 60%.

Este valor de  $\phi_c=60\%$  é incomum, porém deve-se observar que os sólidos não ocupam realmente todo o espaço da entrada da amostra, concentrando-se nas gargantas de poros, de modo que grande parte do espaço disponível está efetivamente vazio e são possíveis porosidades mais altas para o reboco. A existência de  $\phi_c$  elevadas está baseada em um valor calculável que é o parâmetro  $\alpha$ , que indica para testes com a injeção somente de partículas sólidas um pequeno volume ocupado por estes sólidos.

Acredita-se que as correlações obtidas são válidas e podem ser extrapoladas para outros reservatórios. Os valores do método 2B mostraram ajustes melhores para os testes analisados. Para reservatórios sem testes de fluxo em meios porosos será necessário efetuar mais de uma estimativa de  $\phi_c$  para determinar a perda final de injetividade.

## 6.2 Injeção de Partículas Líquidas

O número de testes analisados somente com partículas líquidas (11 testes) foi menor que para partículas sólidas, portanto a correlação desenvolvida deve ser utilizada com cautela. O método 7 utiliza correlações para  $\lambda$  e  $\beta$  com a variável P(ver tabela 8).

No gráfico da figura 61 são mostrados os resultados das estimativas de perda de permeabilidade pelo método 7 para o teste 5.19, bem como o teste original. Como os testes de injeção de partículas líquidas não apresentam  $T_{tr}$ , apenas os parâmetros  $\lambda$  e  $\beta$  serão calculados a partir das correlações em função de  $P$ . Foi calculada apenas a inclinação  $m$  da filtração profunda. Utilizando as equações 3.8 e 3.9 é calculada a perda de permeabilidade.

Na figura 62 são mostradas a curva de impedância simulada e a real para o mesmo teste.

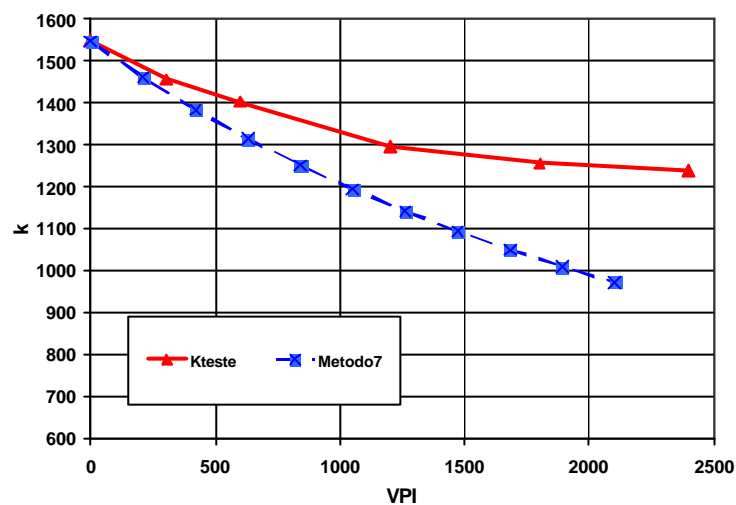


Figura 61: Ajuste da permeabilidade do teste 5.19.

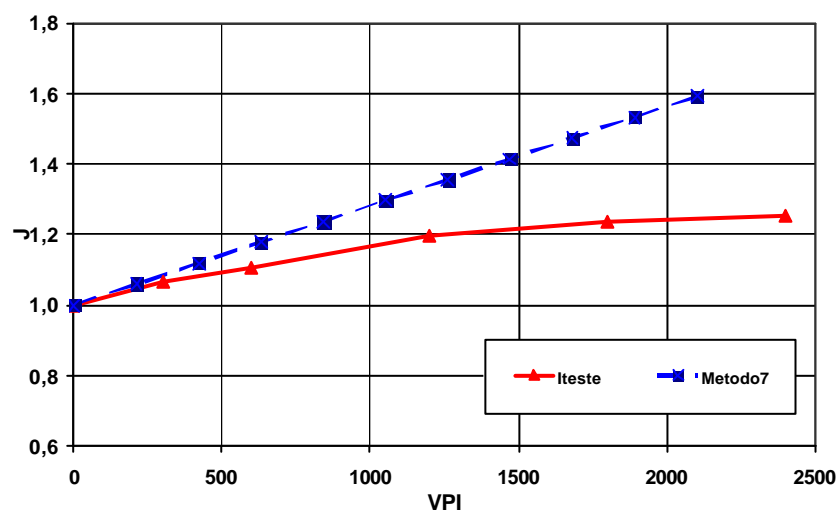


Figura 62: Ajuste da impedância do teste 5.19.

Como nenhum teste atingiu o  $T_{tr}$  o cálculo de  $\alpha$  feito a partir da correlação com  $\beta$  é apenas indicativo e não será apresentado, não é feita a estimativa de  $k_c$ .

O método 7 deve ser encarado como indicativo da perda de injetividade para a injeção de gotas de óleo leve em amostras de média a alta permeabilidade. Para uma correlação melhor seria necessária a análise de mais testes.

### **6.3 Injeção de Partículas Sólidas e Líquidas**

Devido à sua complexidade foram analisadas várias possibilidades de correlações para o caso de injeção de misturas de partículas sólidas e líquidas, todas apresentando a mesma seqüência de cálculo descrita para partículas sólidas. Foram criados 7 métodos.

- Método 1 considera os resultados de todos os testes com partículas sólidas e partículas sólidas e líquidas quando tratadas só como partículas sólidas. Foi considerada uma curva única e todas as correlações foram em função de  $\rho$ .
- Método 1B é igual ao Método 1, exceto pela correlação de  $\lambda$ , função de  $P$ .
- Método 3 considerou só os testes com injeção de partículas sólidas e líquidas, considerando gotas de óleo como partículas, todas as correlações em função de  $\rho$ .
- Método 4 considerou somente os resultados dos testes com partículas sólidas e líquidas quando tratadas como sólidos (não considerando as gotas de óleo) e todas as correlações são função de  $\rho$ .
- Método 4B é idêntico ao método 4, exceto que as correlações para  $\lambda$  e  $\beta$  são função da variável  $P$ .
- Método 5 é uma combinação dos vários resultados obtidos:  $\lambda$  é calculado pelas correlações obtidas para a injeção só de partículas sólidas ( $c_s, \rho_s$ );  $\beta$  é calculado com as correlações de injeção de partículas sólidas e líquidas quando se considera as gotas de óleo;  $\alpha$  é calculado considerando a injeção de mistura de partículas porém considerando apenas a existência de sólidos. Finalmente,  $k_c$  é

definido do mesmo modo que  $\beta$ , ou seja, para misturas considerando as gotas de óleo.  $T_{tr}$  é calculado como se só houvesse sólidos ( $c_s$ ), porém, a inclinação  $m$  da filtração profunda é calculada com a concentração total ( $c_s+c_l$ ). Todas as correlações são funções de  $\rho$ .

- Método 6, é semelhante ao método 5, exceto que  $k_c$  é definido a partir de uma correlação para partículas sólidas. As correlações são função de  $\rho$ .

O resumo dos métodos empregados para todos os tipos de partículas está na tabela 8.

	Tipo de correlação				Tipo de partículas tratados	Considera Partículas líquidas	Comentários
	$\lambda$	$\beta$	$k_c$	$\alpha$			
Método 1	$\rho$	$\rho$	$\rho$	$\rho$	Sól Sól+liq	Não	$T_{tt} = f(c_s)$ $m = f(c_s)$
Método 2	$\rho$	$\rho$	$\rho$	$\rho$	Sól	Não	$T_{tt} = f(c_s)$ $m = f(c_s)$
Método 2B	P	$\rho$	$\rho$	$\rho$	Sól	Não	$T_{tt} = f(c_s)$ $m = f(c_s)$
Método 3	$\rho$	$\rho$	$\rho$	$\rho$	Sól+liq	Sim	$T_{tt} = f(c_s + c_l)$ $m = f(c_s+c_l)$
Método 4	$\rho$	$\rho$	$\rho$	$\rho$	Sól+liq	Não	$T_{tt} = f(c_s)$ $m = f(c_s)$
Método 4B	P	P	$\rho$	$\rho$	Sól+liq	Não	$T_{tt} = f(c_s)$ $m = f(c_s)$
Método 5	$\rho$	$\rho$	$\rho$	$\rho$	Sól+liq	$\beta$ Sim $k_c$ Sim	$T_{tt} = f(c_s)$ $m = f(c_s+c_l)$
Método 6	$\rho$	$\rho$	$\rho$	$\rho$	Sól+liq	$\beta$ Sim	$T_{tt} = f(c_s)$ $m = f(c_s+c_l)$
Método 7	P	P			liq	Sim	$m = f(c_l)$

Tabela 8 Resumo dos métodos estimativa de perda de injetividade.

Reanalizando os 19 testes com partículas sólidas e líquidas tivemos os seguintes resultados:

- ◆ Oito testes se aproximaram do método 7 (só partículas líquidas), pois nenhum deles atingiu o tempo de transição ( $T_{tr}$ ).
- ◆ Dos que atingiram o  $T_{tr}$  ocorreu aos seguintes resultados:
  - Quatro ajustaram com método 4B.
  - Dois ajustaram com o método 5.
  - Dois ajustaram com o método 1.
  - Dos restantes, um ajustou-se ao método 3 e outro ao método 4. Um teste (5,33) não se enquadrou em nenhuma categoria.

Um dos testes que ajustou para injeção de partículas líquidas foi o 4.18 mostrado na figura 63.

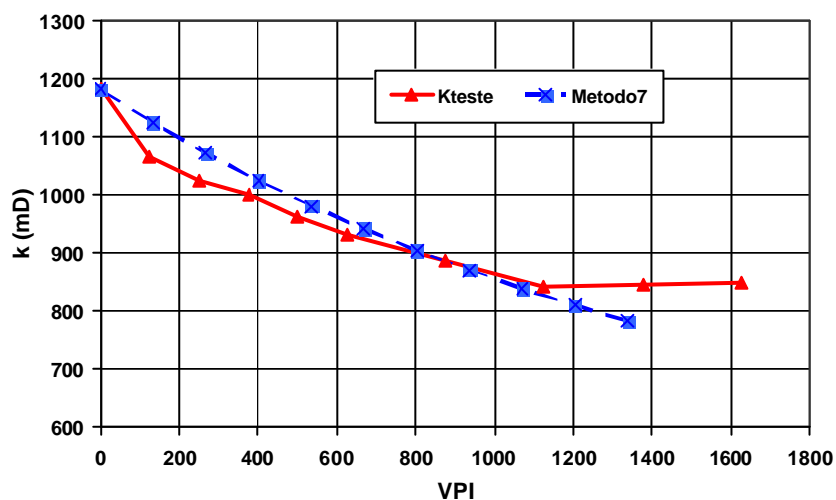


Figura 63: Ajuste de permeabilidade do teste 4.18.

A combinação de pequeno diâmetro das partículas e concentração relativamente baixa de sólidos levou este teste a ter um aspecto típico de um teste com injeção só de partículas líquidas. Este fato ocorreu na maioria dos testes do grupo 5.

Ao contrário o teste D.2 teve um comportamento mais próximo de um teste só com sólidos com um rápido declínio de injetividade.



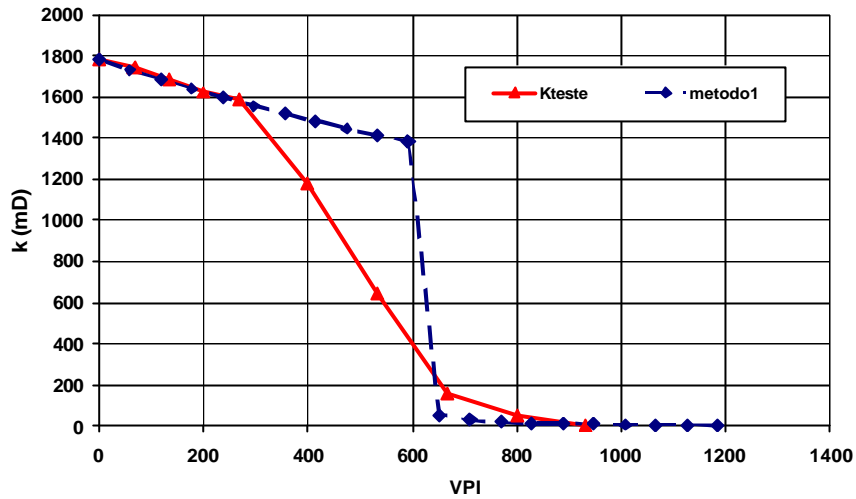


Figura 64: Ajuste de permeabilidade do teste D.2.

Esse comportamento típico de um teste de partículas sólidas é devido à alta concentração de sólidos (60 ppm) que combinado com uma partícula sólida relativamente grande (média de 10  $\mu\text{m}$ ) causou um rápido declínio de injetividade. Porém ambos os exemplos são casos extremos. O comportamento normal para um teste de injeção de misturas foi como no teste 4.19 mostrado abaixo.

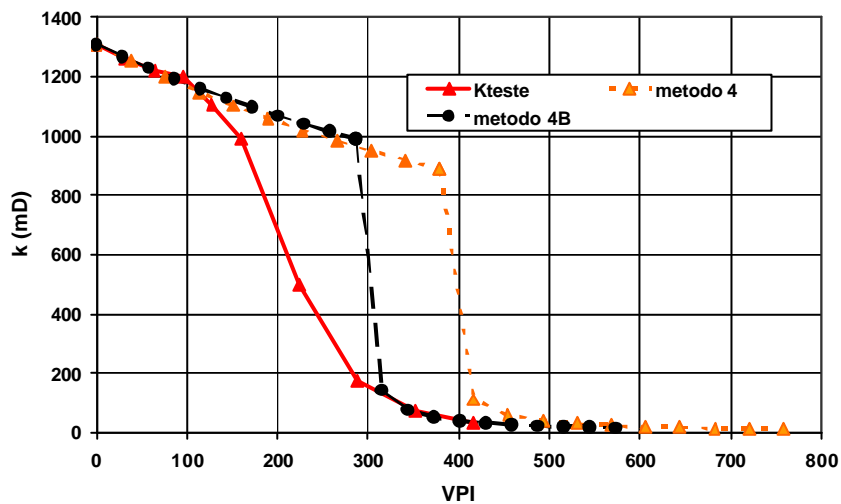


Figura 65: Ajuste de permeabilidade do teste 4.19.

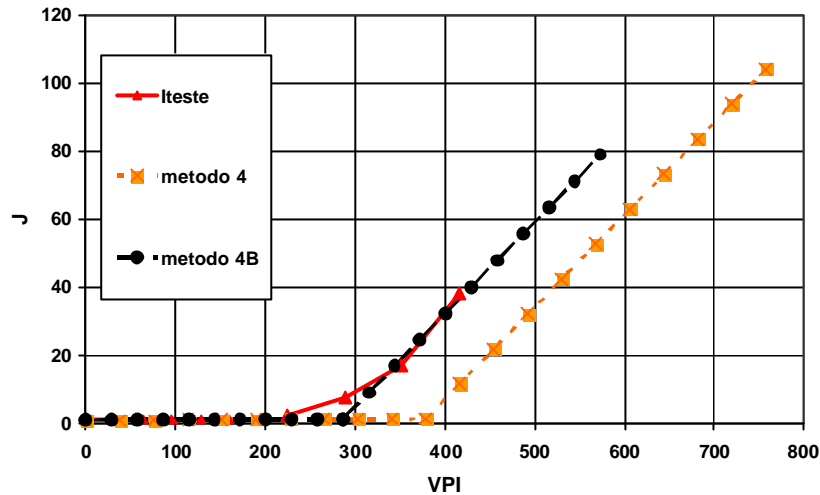


Figura 66: Ajuste de impedância do teste 4.19.

O caso mais comum foi o ajuste pelo método 4B, num total de 4 testes.

Assim como nos ajustes para injeção de partículas sólidas, o ajuste de permeabilidade é feito apenas nos pontos iniciais e finais do gráfico. O ajuste de impedância se dá pelo acerto do  $T_{tr}$  e com o ajuste de  $\phi_c$ , neste caso igual a 25%.

#### 6.4 Resumo Sobre as Correlações

As correlações obtidas para a injeção somente de partículas sólidas ajustam bem os testes com partículas sólidas. Deve-se utilizar as duas correlações disponíveis e efetuar o ajuste final através de  $\phi_c$ .

A correlação para líquidos só é válida para testes que não atingirem o tempo de trânsito (partículas líquidas e misturas).

Quando se injeta na mesma amostra partículas sólidas e líquidas, recomenda-se utilizar os métodos 5, 4B, e 1, considerando os resultados como otimista, pessimista e mediano respectivamente. O método 7 deve ser utilizado para controle do limite mínimo de perda de injetividade como no gráfico abaixo.

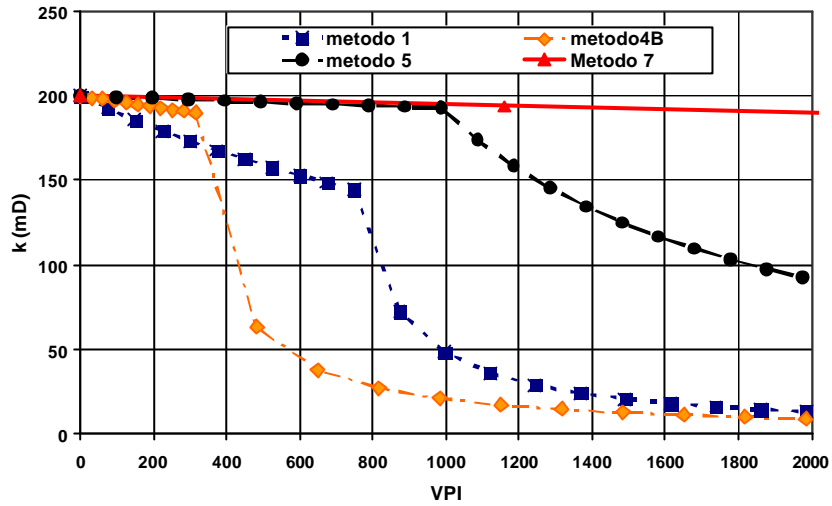


Figura 67: Simulação para a permeabilidade de um reservatório ( $K= 200\text{md}$ ,  $\phi= 24\%$ ,  $\phi_c=25\%$ ,  $D_s= 5\text{m}\mu$ ,  $D_l= 10\text{m}\mu$ ,  $c_s= 5\text{ppm}$ ,  $c_l= 20\text{ppm}$ )

## 7 Análise do Arenito São Tomé.

Nesta seção será analisada a injeção de descarte no Ar. São Tomé, através das correlações desenvolvidas no capítulo 6.

O Arenito São Tomé é um arenito inconsolidado de alta permeabilidade e alta porosidade e idade Miocênica (Almeida et al (2000)).

Este arenito ocorre desde a costa até o talude continental em praticamente todo o comprimento entre o Alto de Cabo Frio e o Alto de Vitória (Figura 68). Nas partes mais rasas da Bacia o Arenito São Tomé aflora entre a costa e até cerca de 20 km da linha de costa. Nas partes mais profundas o arenito é recoberto pelo Carbonato Grussaí.

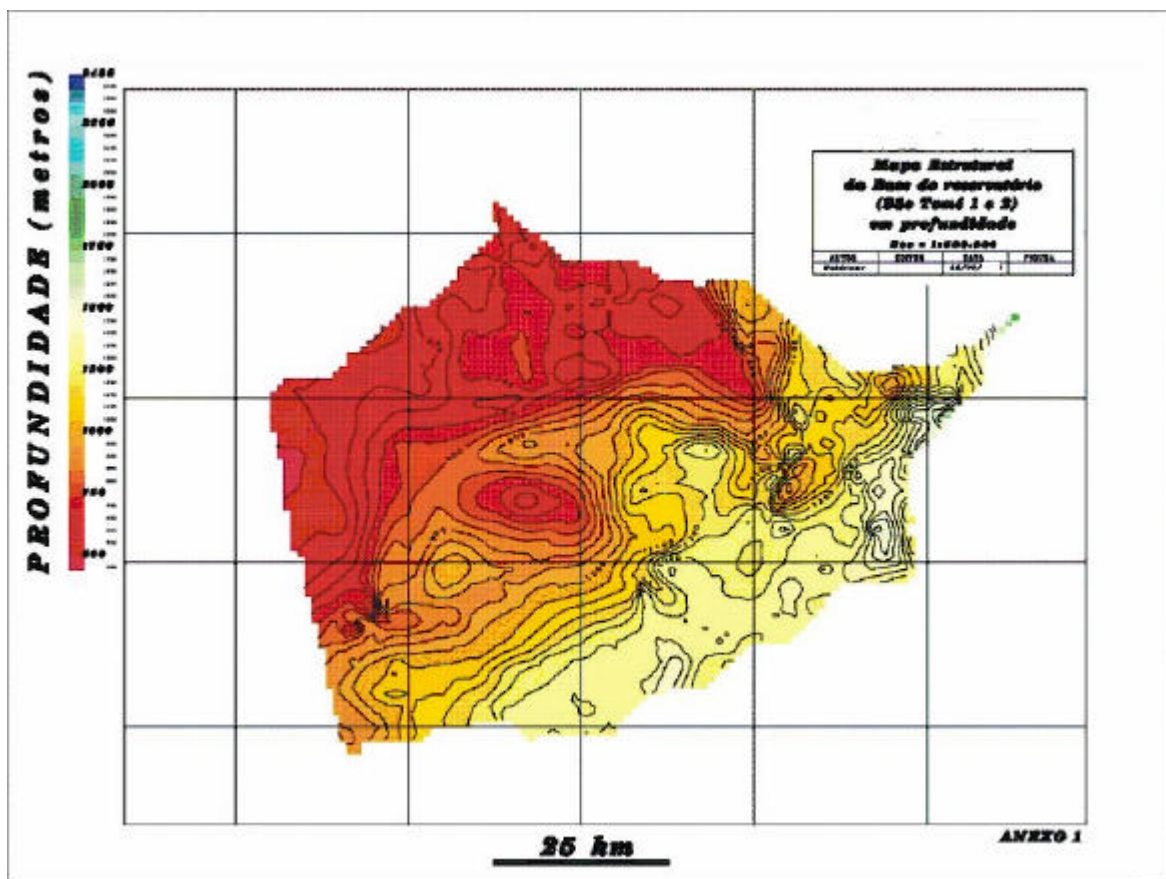


Figura 68 Mapa da Base do Arenito São Tomé.

O Arenito São Tomé está dividido em três seqüências, numeradas de um até três. As duas seqüências superiores (1 e 2) não apresentam nenhum sinal de conterem óleo ou gás.

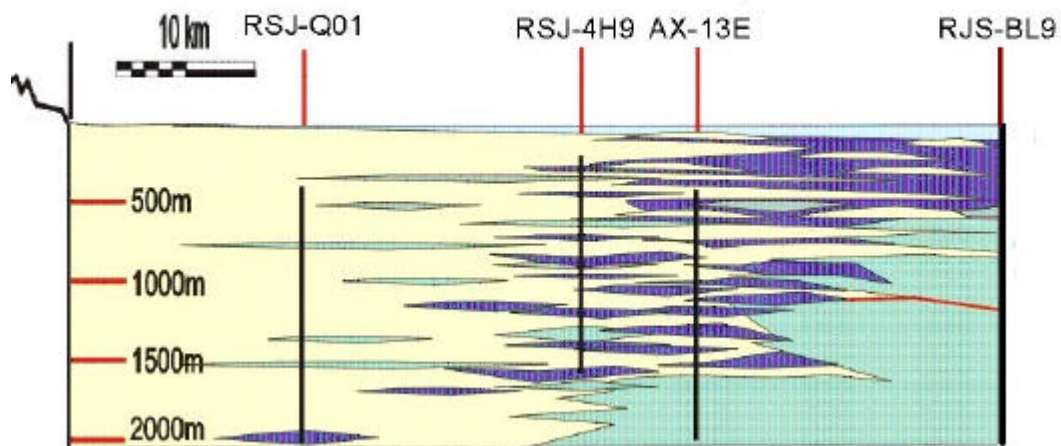


Figura 69 Seção Oeste-Leste

Sob as principais plataformas de produção da parte rasa da bacia os Arenitos São Tomé 1 e 2 tem espessura variando entre 20 a 500 m, sendo nesta região coberto pelo carbonato, como pode se visto na Figura 69 sobre o poço AX-13E.

### 7.1 *Motivação do Uso do Arenito São Tomé*

O influxo de água é o mecanismo predominante de produção de hidrocarbonetos da Bacia de Campos. Praticamente todos os campos têm um aquífero atuante ou tem injeção de água do mar.

Como resultado deste mecanismo um volume crescente de água está sendo produzido pela Bacia de Campos, principalmente nos campos mais maduros da parte rasa da bacia.

Para seu descarte, a água produzida deve ser enquadrada na Norma CONAMA 20 que especifica um teor máximo de óleo e graxa (TOG) de 20 ppm

Os crescentes volumes de água produzida e as perspectivas de ampliação das restrições ambientais para o descarte de água estão levando as operadoras a uma nova análise do uso da água na Bacia de Campos, incluindo o aproveitamento da água produzida para reinjeção. Porém, os volumes previstos para a produção de água ultrapassam as necessidades de injeção.

Sendo assim, existe uma necessidade de se obter um reservatório não produtor de hidrocarbonetos para o descarte do excesso de água produzida, sendo, neste trabalho, sugerido o Arenito São Tomé.

## **7.2 Objetivos**

Como o Arenito São Tomé não é portador de hidrocarbonetos, não houve por parte da Petrobras uma análise mais detalhada da sua petrofísica. Além dos perfis de poço aberto em alguns dos poços, foram feitas algumas análises petrofísicas básicas de porosidade e permeabilidade com amostras de calha, não existindo porém nenhum testemunho deste reservatório ou análises de permeabilidade relativa.

Sendo assim, não existe meio de se determinar se o reservatório pode receber um grande volume de partículas de óleo sem uma sensível perda de injetividade ou qual o teor de óleo (e sólidos) máximo para evitar esta perda de injetividade.

Existem duas possibilidades para resolver este problema: a primeira é a perfuração de um poço para obter um testemunho e realizar os testes de fluxo em meio poroso, que implica num grande investimento. A segunda, a utilização de um reservatório análogo.

Para efeitos práticos os testes analisados nos capítulos anteriores estão no intervalo de permeabilidade e porosidade esperados para o Arenito São Tomé e o óleo utilizado é semelhante aos óleos das plataformas de produção da parte rasa da Bacia de Campos. Também o diâmetro das partículas é semelhante ao encontrado nas águas produzidas destas plataformas. Assim, podem-se considerar os testes analisados como representativos para o Arenito São Tomé.

Toda a análise será feita considerando injeção abaixo da pressão de propagação de fratura, acima da pressão de fratura os modelos analisados não são válidos.

### **7.3 Simulações para o Arenito São Tomé**

Foram consideradas inicialmente três hipóteses para a ocorrência do Arenito São Tomé constatadas através de amostras de calha:

Fácies 1: Arenito com permeabilidade moderada ( $k \leq 500$  mD), porosidade normal (25%).

Fácies 2: Arenito com permeabilidade alta ( $k \approx 1$  D), porosidade alta (30%).

Fácies 3: Arenito com permeabilidade muito alta ( $k > 1$  D), porosidade muito alta (33%).

Será empregado o método 5 como base deste estudo porque o mesmo se revelou como o melhor método para representar a perda de injetividade para misturas quando ocorrem grandes concentrações de líquidos (acima de 100ppm) e concentrações mais baixas de sólidos (da ordem de 5 ppm).

A primeira simulação utilizando o Método 5 teve como objetivo analisar o efeito da injeção de uma água típica de descarte, estando esta enquadrada na norma CONAMA 20 em relação ao teor de óleo e graxa (TOG), com um total de 20 ppm de óleo, nas diversas fácies.

Para esta simulação utilizou-se um teor de sólidos de 5 p.p.m e o diâmetro de todas as partículas de 5  $\mu$ m. Estes dados foram obtidos de análises de água descartada por uma operadora.

Na figura 70 pode-se ver o efeito da variação de permeabilidade e porosidade. Como é esperado, à medida que a permeabilidade e a porosidade se reduzem o tempo de transição também cai. A permeabilidade final é semelhante em qualquer um dos casos, pois ela é dominada pela permeabilidade do reboco.

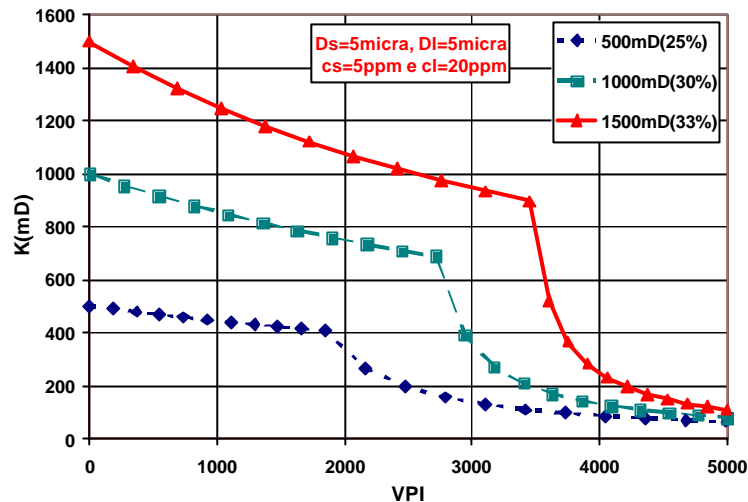


Figura 70: Simulação da perda de injetividade de amostras do Arenito São Tomé.

Deve-se, porém observar que mesmo no caso mais severo a região da filtração profunda é bastante grande (1840 VPI). Este valor tem sentido quando analisamos que os testes de misturas com baixas concentrações de óleo não atingiram na maioria dos casos o  $T_r$  em comparação com as médias dos testes anteriormente analisados (Tabela F.23).

A fácies mais representativa é a 2, a mais comum entre as amostras de calha disponíveis (Almeida et al (2000)). Para outras simulações considera-se apenas esta fácies.

### 7.3.1 Efeitos da Concentração de Líquidos

Foi analisada uma grande variação de concentração de óleo porque esta é uma variável crítica no processo de descarte de água produzida. O custo do tratamento da água para descarte aumenta sensivelmente com a redução do TOG devido ao maior número de equipamentos, produtos químicos e mão de obra empregada, sem mencionar a área total ocupada, um outro fator crítico em plataformas marítimas.

Em função destes custos as operadoras têm a preferência de injetar a água da pior qualidade possível que seja aceita pelo poço.



Por outro lado se a qualidade for tão baixa que o tempo entre o início da injeção e a necessidade de intervenção para recuperação da injetividade for pequeno, os custos de intervenção passam a ser mais importantes que os custos de operação.

Assim a escolha da qualidade de água esta intimamente ligada ao custo total de um projeto de descarte.

Na figura 71 está sendo mostrado o efeito do relaxamento da qualidade da água descartada em função da concentração de óleo.

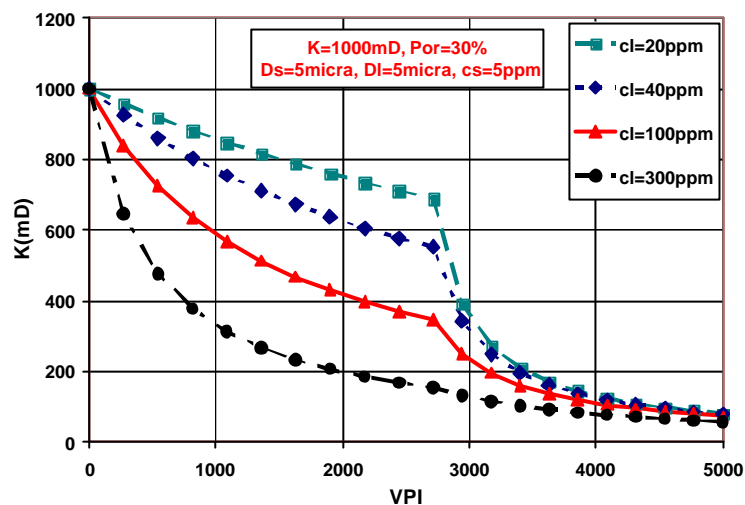


Figura 71: Variação de permeabilidade em função do TOG.

O efeito do aumento da concentração das partículas líquidas, não altera o tempo de transição ou a permeabilidade final, mesmo quando a concentração é mais alta. Para 300 ppm de óleo a curva aparentemente não apresenta tempo de transição, mas este ocorre, de maneira suave. O aumento influenciou principalmente na queda de injetividade inicial durante a filtração profunda.

Para verificar qual é o limite aceitável para a piora da qualidade da água devem-se observar os valores obtidos após uma redução significativa de permeabilidade. Neste caso foi escolhido o ponto onde a permeabilidade se reduz a 20% do valor original.

Observando os resultados da simulação pode-se ver que o tempo necessário para que a permeabilidade tenha uma queda de 80% do seu valor não é tão distinto nas 3 primeiras curvas que tem teores de óleo de 20, 40 e 100 ppm. Porém reduz drasticamente para a última curva que tem um teor de 300 ppm.

Em termos práticos este resultado indica que se pode reduzir a qualidade da água até um teor de óleo de 100 ppm sem que o tempo de intervenção seja afetado significativamente.

### 7.3.2 Efeitos da Concentração de Sólidos

O caso base tem a concentração de 5 ppm de sólido, valor considerado normal para água de injeção em reservatório.

Assim como a quantidade de óleo a concentração de sólidos tem um custo para a operadora: quanto menos for retirado mais barato será a injeção. Foram analisados três casos de concentração de sólidos vistos na figura 72.

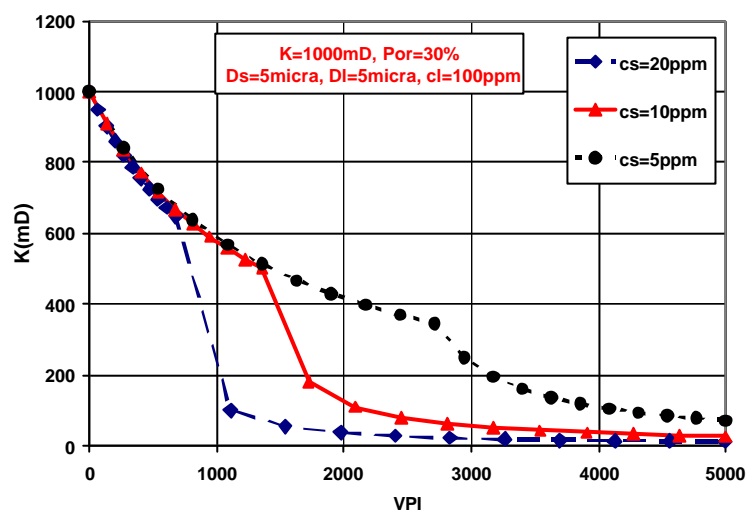


Figura 72: Variação de permeabilidade em função da concentração de sólidos.

Infelizmente o aumento da concentração de sólidos reduz drasticamente o tempo de transição e a permeabilidade final da amostra.

Para atingir uma redução de permeabilidade de 80%, um incremento de 5ppm de partículas sólidas reduz à metade o tempo de transição, um incremento de 15ppm reduz o tempo de transição a um terço do original. Também a permeabilidade no final do teste simulado é bem maior com a concentração inicial de 5 ppm (70 mD contra 11 mD).

Como para um projeto de descarte de água bem sucedido será necessário o menor número possível de intervenções, o aumento da concentração de sólidos deve ser evitado. Para o Arenito São Tomé deverá ser limitada em apenas 5 ppm de sólidos.

### 7.3.3 Efeitos do Diâmetro das Partículas Líquidas

O efeito do tamanho das partículas de óleo no plug está ilustrado na figura 73.

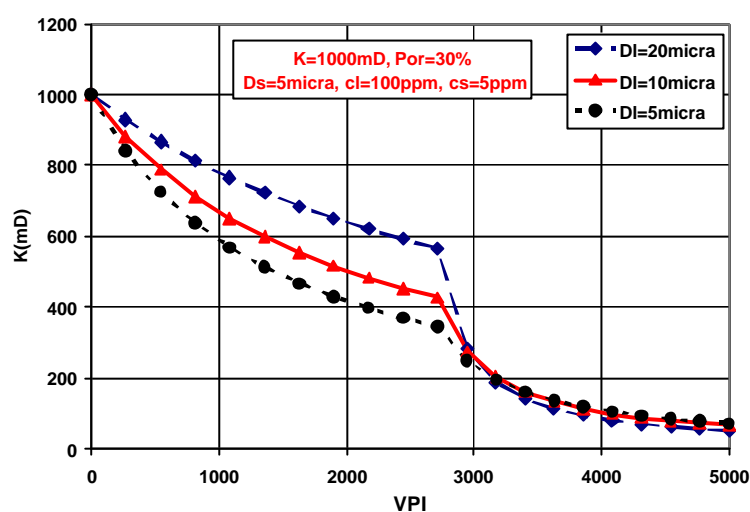


Figura 73: Variação de permeabilidade em função do diâmetro da gota de óleo.

O aumento do tamanho das gotas de óleo tem como principal efeito aumentar a queda de permeabilidade durante a filtração profunda sem no entanto modificar o tempo de transição ou a permeabilidade final, que são dominadas pelas partículas sólidas.

Assim, um aumento no diâmetro das gotas de óleo tem um efeito negligenciável na perda de injetividade. Como base para a última simulação será utilizado o valor de  $5\ \mu\text{m}$ , porém não existiria motivo para limitar o tamanho de gota de óleo durante a injeção de descarte.

### 7.3.4 Efeitos do Diâmetro das Partículas Sólidas

Ao contrário do que acontece nas partículas líquidas, o aumento do diâmetro das partículas sólidas tem um efeito na queda de injetividade semelhante ao aumento da concentração de sólidos.

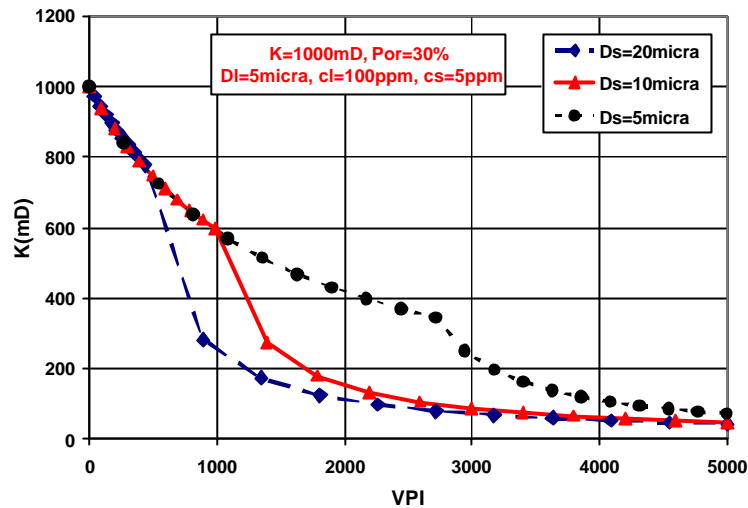


Figura 74: Variação de permeabilidade em função do diâmetro da partícula sólida.

O aumento do diâmetro das partículas sólidas reduz à metade ou menos o tempo de transição bem como a permeabilidade final. Mesmo um aumento de diâmetro de 5  $\mu\text{m}$  reduziria em cerca de 45% o tempo entre intervenções inviabilizando um projeto de descarte de água.

#### 7.4 Análise de Surgência

Para estimar se as partículas poderiam surgir no fundo do mar foi analisado o parâmetro  $\lambda$ .

A penetração de uma partícula em um meio é função de  $\lambda$ , quanto menor o parâmetro maior a penetração. Assim, foram analisados os testes de partículas sólidas e partículas líquidas e efetuadas as distribuições de probabilidade, assumindo que as mesmas fossem log-normais.

Nas figuras 75 a 78 são mostradas as distribuições:

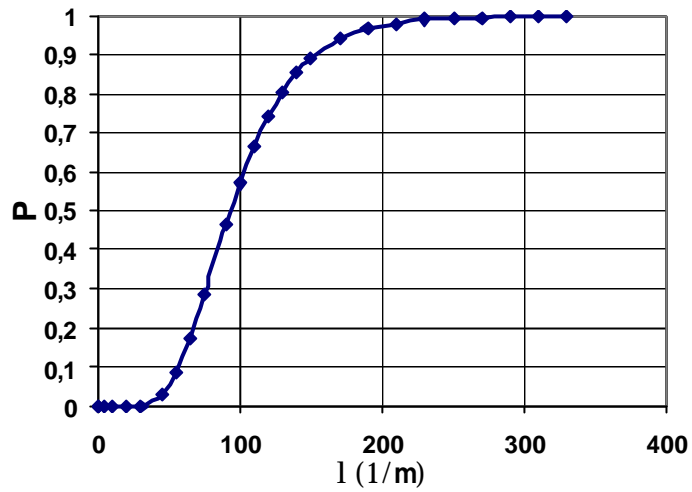


Figura 75: Distribuição Acumulada de  $\lambda$  para partículas sólidas (Log-normal).

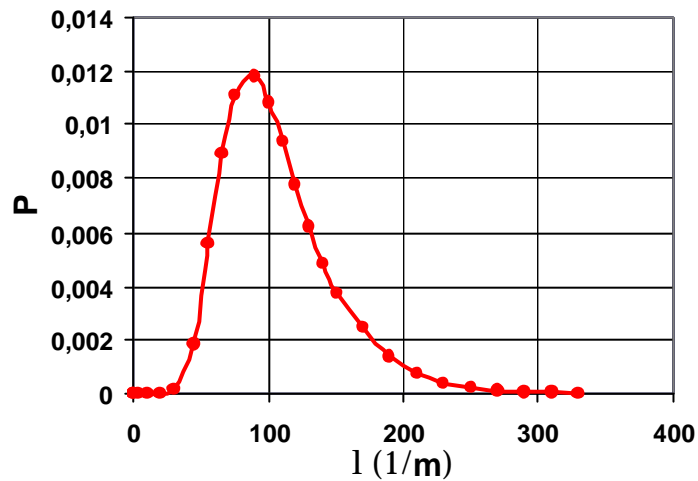


Figura 76: Distribuição de  $\lambda$  para partículas sólidas (Log-normal).

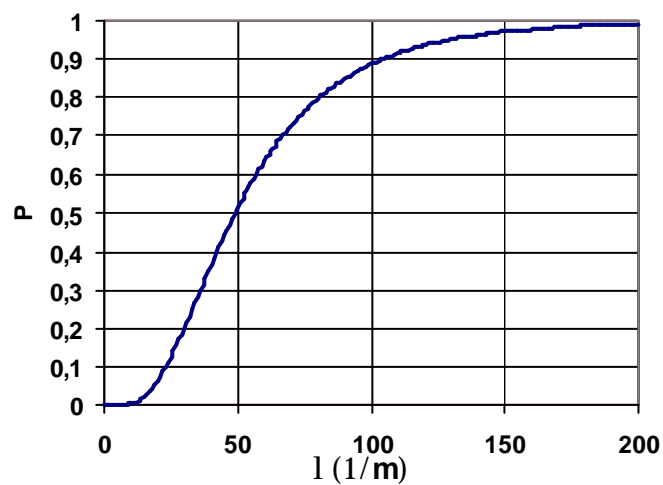


Figura 77 Distribuição Acumulada de  $\lambda$  para partículas Líquidas (Log-normal).

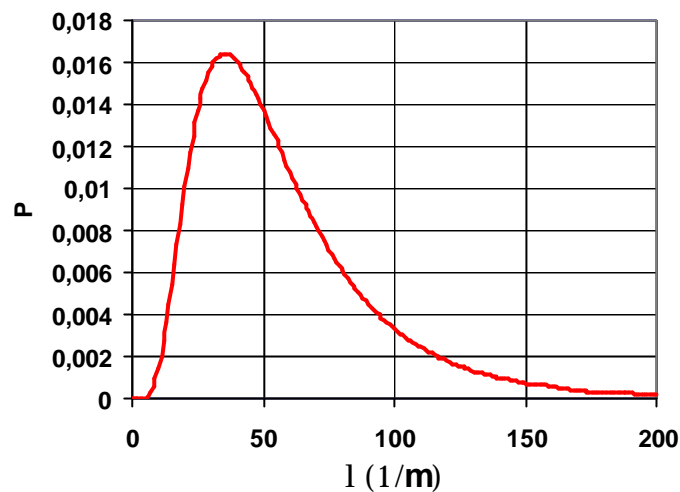


Figura 78 Distribuição de  $\lambda$  para partículas líquidas (Log-normal).

Para sólidos teríamos uma probabilidade menor que  $1,11022 \times 10^{-16}$  para a ocorrência de um valor de  $\lambda$  menor que 3,8 1/m e para líquidos, probabilidade de  $\lambda$  ser menor que 0,4 1/m também é menor que  $1,11022 \times 10^{-16}$ , não foram calculadas probabilidades para valores de  $\lambda$  menores que os citados, porque que  $1,11022 \times 10^{-16}$  é o menor valor que o programa<sup>4</sup> podia calcular para uma probabilidade em função dos dados de entrada e do seu limite de precisão.

Também foi analisado o valor necessário para que ocorra surgência no fundo oceânico.

Foi considerado que a injeção de descarte seria feita com um teor de 100 ppm de óleo (seção 7.4.1), e que existiria um ponto de contato direto entre o poço e fundo oceânico a 10 km de distancia.

---

<sup>4</sup> Microsoft Excel 2002.

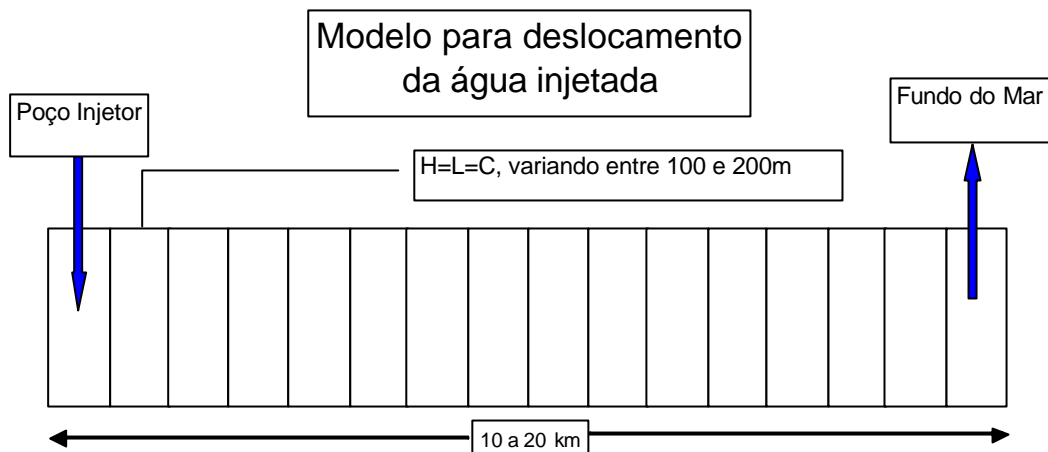


Figura 79: Diagrama do possível fluxo em reservatório.

A concentração de saída através de um meio poroso linear pode ser descrita com:

$$C(x, T) = c_0 \exp(-\lambda x) \quad (7.1)$$

Onde  $x$  é a distância da entrada do meio poroso.

Utilizando a equação 7.1 e variando o coeficiente de filtração, pode-se determinar a concentração na saída do meio poroso.

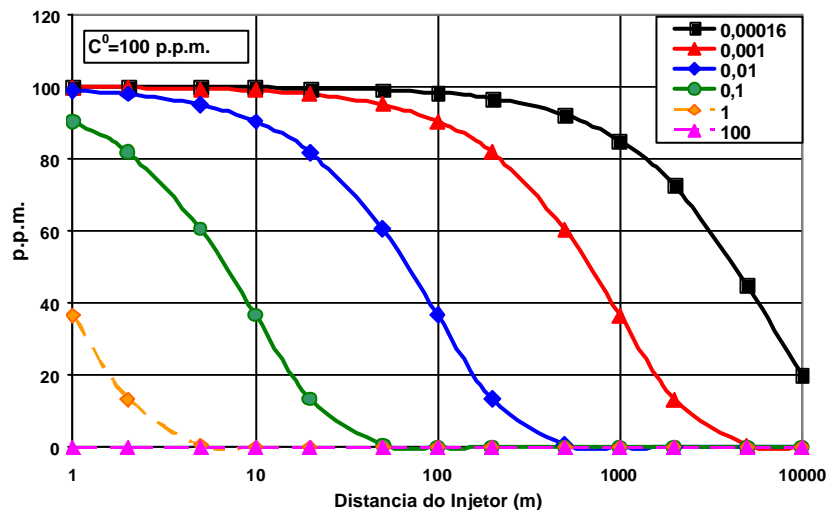


Figura 80: Concentração de saída em função de  $\lambda$  e  $x$ .

Observando a figura 80 verifica-se que o valor de  $\lambda$  necessário para que as gotas de óleo com a concentração de 20 ppm atinjam o fundo oceânico é de

0,00016 1/m. O maior valor de  $\lambda$  para que haja o surgimento de uma pequena concentração de óleo (0,005 ppm) é de 0,001 1/m.

Considerando o cálculo de probabilidade anterior e que o valor médio de  $\lambda$  que está entre 50 e 100 1/m pode-se considerar que não há risco de surgência do óleo no fundo oceânico.

### **7.5 Cálculo do Número de Poços**

Para determinar o número de poços necessários a um projeto de descarte de água produzida são necessários alguns dados iniciais:

Vazão de água do projeto ( $Q_{inj}$  (m<sup>3</sup>/dia)).

Índice de Injetividade inicial ( $II_0$  (kgf/cm<sup>2</sup>/ m<sup>3</sup>/dia)).

Diferença de pressão aplicado nos canhoneados ( $\Delta P$  (kgf/cm<sup>2</sup>)).

Para um projeto de descarte em um campo de médio porte na parte rasa da Bacia de Campos (Campo K) pode-se estimar a vazão de projeto em 10.000 m<sup>3</sup>/dia.

Como o Arenito São Tomé e comunicado com o fundo do mar sua pressão estática é constante e praticamente igual à coluna hidrostática. O  $\Delta P$  será então o  $\Delta P$  fornecido pelas bombas menos as perdas de carga nas linhas de injeção e na coluna de injeção. Considerando as bombas normais que estão em operação na Bacia de Campos um  $\Delta P$  nos canhoneados de 100 kgf/cm<sup>2</sup> pode ser obtido sem dificuldade.

A estimativa do  $II_0$  é mais difícil, porque não há praticamente dados sobre testes de pressão neste reservatório. Foi efetuado um único teste de injeção em um poço neste reservatório. O teste foi efetuado na fácies menos porosa (fácies 1) e teve um  $II_0$  de 10 kgf/cm<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>/dia para uma extensão de canhoneado de 40 m.

Considerando a perfuração de um poço novo melhor posicionado atingindo a fácies intermediária (fácies 2) e com um extensão de canhoneio de 100 m está sendo estimado um  $II_0$  de 50 kgf/cm<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>/dia.

A vazão então poderia ser estimada pela equação:



$$Q_{inj} = \Delta P \Pi_0 \quad (7.2)$$

O que permitiria injetar 5000 m<sup>3</sup>/dia por poço, para a cota prevista seriam necessários 2 poços para descartar 10000 m<sup>3</sup>/dia.

Para determinar a perda de injetividade destes poços é necessário determinar os valores mais prováveis de  $\lambda$ ,  $\beta$  e  $\alpha$ .

O valor de probabilidade média (P50) para o coeficiente de filtração pode ser determinado considerando a distribuição log-normal das figuras 75 e 77. Observa-se que para sólidos o valor é de 93 1/m e para líquidos 49 1/m, para misturas os valores podem ser obtidos das distribuições semelhantes com valores de 58,5 1/m quando se consideram todas as partículas e 58,7 1/m, quando só consideram-se as partículas sólidas.

Para  $\beta$  também podem ser feitas as distribuições de probabilidade, nas figuras 81 e 82 são mostradas as distribuições para sólidos e líquidos.

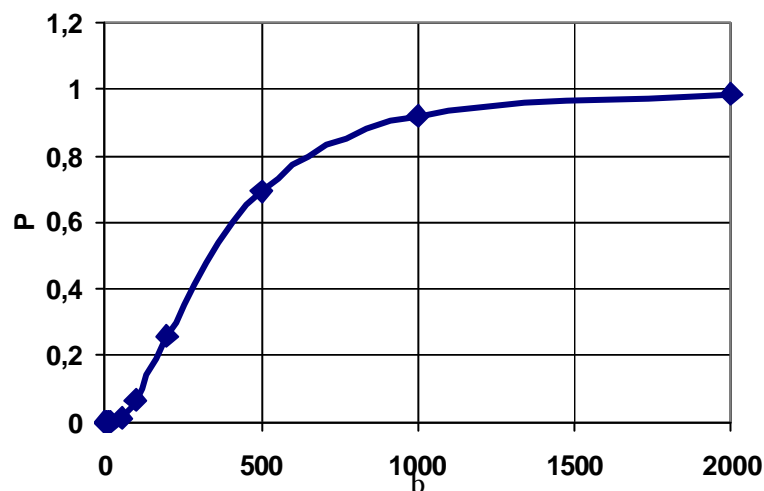


Figura 81: Distribuição de probabilidade para  $\beta$ , partículas sólidas.

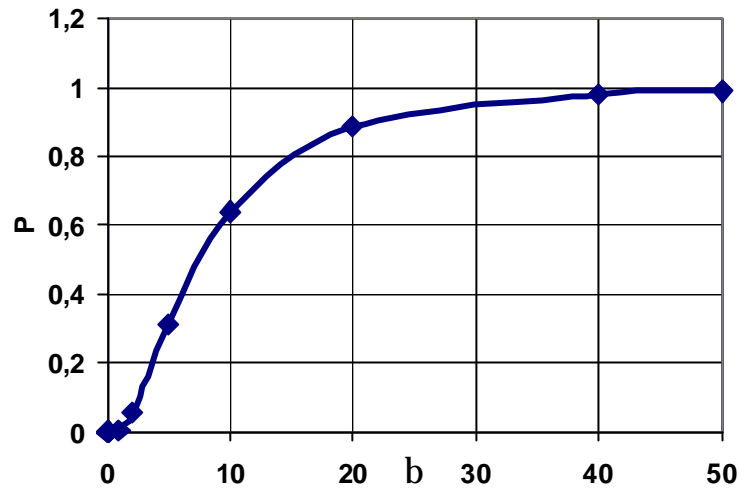


Figura 82: Distribuição de probabilidade para  $\beta$ , partículas líquidas.

Os valores P50 para  $\beta$  são os seguintes; sólidos de 332, líquidos de 7,5, misturas(considerando todas as partículas) de 14,5 e misturas considerando apenas partículas sólidas de 278,5.

Para a fração da porosidade crítica serão utilizados dois valores, 0,1 para sólidos e misturas considerando apenas partículas sólidas e 0,5 para líquidos e misturas considerando todas as partículas.

Para o caso da injeção de partículas sólidas e de misturas só considerando partículas sólidas a redução de injetividade é de 80%, como é mostrado na figura 83.

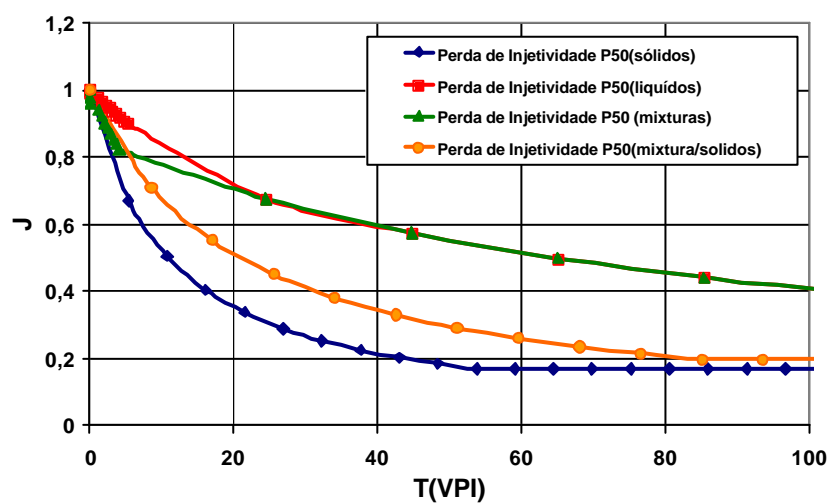


Figura 83: Perda de injetividade calculada para um poço injetor proposto no Ar. São Tomé.

Considerando esta hipótese com a mais provável haveria a necessidade de se utilizar até um total de 10 poços para injeção de descarte.

Como essa configuração é anti-econômica haverá necessidade de serem feitas limpezas periódicas nos poços injetores ou injetar acima da pressão de fratura.

## **7.6 Resumo dos Resultados**

1 - Apesar da ausência de amostras do Arenito São Tomé, foi possível construir uma série de correlações aplicáveis ao arenito utilizando as técnicas disponíveis e os testes da Universidade de Deft e assim simular seu comportamento à injeção de água de descarte.

2 - Em relação às partículas sólidas será necessário ocorrer uma restrição bastante grande para evitar intervenções prematuras.

3 - Como recomendação para a injeção de descarte no Arenito São Tomé adota-se os seguintes valores

- Concentração de partículas sólidas: Máximo de 5 ppm.
- Diâmetro das partículas sólidas: Máximo de 5  $\mu\text{m}$ .
- Concentração de partículas líquidas: Máximo de 100 ppm.
- Diâmetro das partículas líquidas: Máximo de 20  $\mu\text{m}$ .

Acredita-se que dentro deste intervalo de valores a injeção de descarte não deverá apresentar problemas.

4 – Deve-se analisar a opção de injeção acima da pressão de fratura como uma alternativa de descarte, de modo a poder aliviar a especificação dos parâmetros descritos no item 3.

5 – As probabilidades de surgência de óleo no fundo oceânico são praticamente nulas.

6 – Serão necessários 2 poços injetores para o descarte da água produzida em um campo de médio porte na Bacia de Campos.

## 8 Conclusões

Objetivo geral desta dissertação foi o estudo da injeção de água produzida para descarte em reservatórios com comunicação com o fundo oceânico, em particular do Arenito São Tomé, da Formação Emborê na Bacia de Campos.

Como na literatura não foi encontrado um método ou modelo para o cálculo da perda de injetividade e dos parâmetros da perda de injetividade, coeficiente de dano à formação, coeficiente de filtração, permeabilidade do reboco e a porosidade crítica, de uma forma simples e confiável foi necessário desenvolver um método de cálculo destes parâmetros a partir de testes de injeção de partículas em meios porosos (amostras) que pode ser facilmente aplicado para a análise do Arenito São Tomé.

O ponto de partida para as análises dos testes foi a metodologia de solução denominada Método dos Três Pontos (Bedrikovetsky et al, (2000)) que permite determinar os coeficientes de filtração e dano a formação, sendo que a partir dele foi desenvolvido as soluções para a permeabilidade do reboco e a porosidade crítica.

A partir da determinação dos parâmetros da perda injetividade foram realizadas um grande numero de análises gráficas para determinar as relações entre os parâmetros da perda de injetividade e as propriedades das amostras, a partir das quais foram determinadas correlações para a simulação do comportamento do Arenito São Tomé a injeção de água de descarte.

Como conclusões finais deste trabalho podemos destacar:

As técnicas descritas nos capítulos 4 e 5 foram bem sucedidas para os cálculos dos parâmetros  $\lambda$ ,  $\beta$ ,  $k_c$  e  $\alpha$ .

A boa correlação entre  $\alpha$  e  $\beta$  permite estimar o valor de  $\alpha$  (mesmo que o teste não tenha uma boa definição do  $T_{tr}$ ) e resolver a determinação da filtração profunda (valores de  $\alpha$ ,  $\lambda$  e  $\beta$ ) sem o uso do método dos 3 pontos através da solução do sistema de equações 4.5, 4,6 e 4.7 (para partículas sólidas) ou 4.5, 4,6 e 5.3 (para misturas).

Pelos resultados dos testes apenas para injeção de partículas líquidas pode-se perceber que as mesmas têm uma ação praticamente desprezível sobre o dano à

formação, e que os resultados globais do coeficiente de filtração são da mesma ordem de grandeza para qualquer tipo de partícula. Pode-se verificar que as gotas de óleo tendem a se deslocar no meio poroso não ficando retidas na entrada da amostra como as partículas sólidas.

Para  $\beta$  os resultados de injeção de partículas sólidas e líquidas indicam que o efeito das gotas de óleo é significativamente menor que o efeito dos sólidos injetados. A explicação para este fato é a deformação das partículas líquidas nas gargantas de poro, resultando na divisão de parte das partículas nos poros menores e o seu retorno ao fluxo.

Os resultados da revisão do modelo indicam que  $\lambda$  é o parâmetro menos sensível ao tipo de partícula injetada. Este parâmetro praticamente não sofre alteração em seus valores quando não se consideram as gotas de óleo como partículas.

Na ausência de testes de misturas uma estimativa do valor de  $\beta$  para misturas poderia ser obtido utilizando-se a equação 4.13 e os valores de testes de partículas sólidas e de partículas líquidas.

O parâmetro  $\beta$  foi aquele que teve a variação mais significativa quando não se consideram as partículas líquidas. Considerar que somente as partículas sólidas causam dano à formação pode ser uma boa aproximação para os testes onde estas são predominantes. Porém, não se deve desprezar os efeitos das altas concentrações de óleo.

O parâmetro  $k_c$  apresentou valores baixos tanto para injeção de partículas sólidas como para misturas. Quando foi feita a revisão do modelo, a mesma apresentou uma variação percentual de 86% porém uma variação de valor absoluto pequena (1mD). Para efeitos práticos faz pouca diferença, pois eles são muito baixos.

A porosidade crítica ( $\alpha$ ) apresenta valores baixos para a injeção de partículas sólidas e valores altos para partículas líquidas e misturas. Acredita-se que considerar que apenas as partículas sólidas causem dano representa melhor a deposição de partículas no meio poroso, pelo menos para óleos de baixa viscosidade onde este não pode ser tratado como uma partícula. O óleo não participa da formação do reboco porque se desloca quando a saturação excede o

valor residual, assim a entrada da amostra não contém óleo com saturação mais alta que a saturação de óleo residual.

As correlações obtidas têm suas limitações, porém estão dentro do intervalo de permeabilidade e porosidade do Arenito São Tomé e permitiram simular os teste de fluxo em meio poroso do Arenito São Tomé e assim determinar seu comportamento à injeção de água de descarte.

Para o Ar. São Tomé os resultados indicam que as partículas líquidas não são o problema fundamental numa injeção de descarte que é dominada pelas partículas sólidas. Os teores de óleo na água de descarte poderão ser bem acima dos valores do CONAMA 20.

Em relação às partículas sólidas será necessário ocorrer uma restrição bastante grande para evitar intervenções prematuras ou injetar acima da pressão de fratura do reservatório.

## 9 Recomendações para Trabalhos Futuros

1. É necessário fazer um novo tipo de teste com um pós-fluxo de água sem sólidos e gotas de óleo para verificar se o dano criado pelas gotas de óleo pode ser removido.
2. O uso das correlações entre  $\alpha$  e  $\beta$  para a re-interpretação de testes de fluxo em meio poroso (que estejam nos intervalos de porosidade e permeabilidade das correlações) com objetivo de determinar  $\alpha$ ,  $\lambda$  e  $\beta$  sem o uso do método dos 3 pontos.
3. É necessário efetuar novos testes de fluxo para verificar se quando as partículas de óleo apresentam viscosidades elevadas, estas passam a se comportar como partículas sólidas.
4. Deve-se analisar a opção de injeção acima da pressão de fratura como uma alternativa de descarte, de modo a poder aumentar o teor de sólidos para a injeção de descarte.
5. Avaliar os efeitos do fracionamento das partículas líquidas nos poros da formação e seu efeito no coeficiente de dano a formação.
6. Quando não existirem testes recomenda-se utilizar um valor de  $k_c$  entre 0,05 e 0,50 mD para partículas sólidas, se for considerada também a injeção simultânea de partículas líquidas o valor recomendado fica entre 0,50 e 2,00 mD. Pelas análises feitas, estes limites são aceitáveis para o cálculo de perda de injetividade de poços injeção de água.
7. A utilização da metodologia descrita para testes em meios porosos para o caso radial e análise de resultados de testes de injetividade em poços.
8. A utilização do Arenito São Tomé para descarte de água produzida.

## 10 Referências Bibliográfica.

- Al-Abduwani, F.A.H., van den Broek, W.M.G.T. and Currie, P.K., Delft University of Technology, 2001, Visual Observation of Produced Water Re-Injection Under Laboratory Conditions, SPE 68977, SPE European Formation Damage Conference, The Hague.
- Al-Riyamy, K. And Sharma, M. M., 2002, Filtration Properties of Oil-in-Water Emulsions containing Solids, SPE 73769, SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette.
- Almeida Jr, W., et al, 2000, Mapeamento e Caracterização Geológica dos Reservatórios Rasos para Descarte, Relatório Interno do CENPES (Pravap 9, Projeto 5), Rio de Janeiro, 2000.
- Amix, B., Bass, R. and Whiting, A., 1964, Applied Reservoir Engineering, McGraw Hill Book Co, Nova York.
- Barkmam, J.H. and Davidson, D.H., 1972, Measuring Water Quality and Predicting Well Impairment, J.Pet. technol, 865-875.
- Bedrikovetsky, P., Marchesin, D., Shecaira, F. Souza, Milanez, P. and Resende, E.R., 2000, Injectivity Decline Caused By Injection of Sea/Produced Water, IBP 43300, Rio Oil and Gas Expo end Conference, Rio de Janeiro.
- Bedrikovetsky, P., Marchesin, D., Shecaira, F. Souza, Marchesin, A., Milanez, P. and Resende, E.R., 2001a, Well Impairment During Sea/Produced Water Flooding: Treatment of Laboratory Data, SPE 69546, 7th Latim American and Caribbean Petroleum Engineering conference.
- Bedrikovetsky, P., Marchesin, D., Shecaira, F. Souza, Milanez, P. and Resende, E.R., 2001b, Characterization of Deep Bed Filtration System from laboratory Pressure Drop Measurements, Journal of Petroleum Science And Engineering, 32(2001) pg 167 to 177.
- Bedrikovetsky, P., Tran P., W. M. G. T. Van den Broek, Marchesin D., Silva M.F., Siqueira A., Serra A. L., and Shecaira F., 2002, Damage Characterization of Deep Bed Filtration from Pressure Measurements, SPE 73788, SPE



International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette.

- Bedrikovetsky, P., 1993, *Mathematical Theory of Oil & gas Recovery (with applications to Former USSR Oil & Gas Condensate Fields)*, Kluwer Academic Publishes, London-Boston-Dordrecht.
- Bruin, J. N., 1998, *Permeability Decline Caused By Simultaneous Invasion Of Solid Particles And Oil Droplets*, Thesis, Delft University of Technology, Sub faculty of Applied Earth Sciences, Netherlands.
- Dake, L.P., (1978). *Fundamentals of Reservoir Engineering*. Amsterdam, The Netherlands, Elsevier Science B.V.: 343-430.
- Evans, R. C., 1994, *Developments in Environmental Protection Related to Produced Water Treatments and Disposal (Produced Water Re-Injection)*, SPE 27179, SPE International Conference on Health, Safety & Environment in Oil and Gas Exploration and Production, Jakarta.
- Eylander, J.J.R., 1988, *Suspended Solids Specifications for Water Injection for Coreflood Tests*, SPE RE, 1267-1300.
- Frydaman, M., and Fontoura, S. A. B., 2000, *Produced Water Re-Injection in a Numerical Coupled Approach*, Rio Oil & Gas Expo and Conference, Rio de Janeiro.
- Furuholt, E., 1996, *Produced Water 2, Environmental Issues and Mitigation Technologies*, pg 275 to 288, M. Reed and Johnsen, Plenum Press, New York, 1996.
- Garland, E. and Hjelde, E., 2003, *Discharge of Produced Water: New Challenges in Europe*, SPE 80585, SPE/EPA/DOE Exploration and production Environmental Conference, São Antonio.
- Gümrah, F., Erbas, D., Öz, B. and Altintas, S., 1999, *Waste Water Disposal: Polluted Aquifer Cleanup Optimization by Using Genetic Algorithms*, Energy Sources, 22, pg 543-556, 2000.
- Herzig, J.P., Leclerc, D.M. and Goff, P., 1970, *Flow of Suspensions through Porous Media - Application to Deep Filtration*, Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 62, No. 5, May, p.8-35.

- Hofsaess, T. and Kleinitz, W., 2003, 30 Years of Predicting Injectivity after Barlman & Davidson; Where Are We Today, SPE 82231, SPE European Formation Damage Conference, The Hague.
- Iwasaki, T., 1937, Some Notes on Sand Filtration. Amer. Water Works Assoc., 29, pg. 1591 to 1602, (apud Tien e Paytakes, 1979).
- Khatib, Z.I., 1994, Prediction of Formation Damage Due to Suspended Solids: Modeling Approach of Filter Cake Buildup in Injectors, SPE 28488, PE 66th Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, 25-28 September
- Marthinsem, I. and Sjørgård, T., 2002, Zero Discharge Philosophy: Joint Project Between Norwegian Authorities and Industry, SPE 74000, SPE International Conference on Health, Safety & Environment in Oil and Gas Exploration and Production, Kuala Lumpur.
- Mendez, Z., 1999, Flow of Dilute Oil-in-Water Emulsions in Porous Media, Tesis, The University of Texas, Austin.
- Milazez, P.V.A. and Daher, J.S., 2000, Filtro Equivalente – Uma Nova Ferramenta Para o Gerenciamento da Qualidade da Água de Injeção, Rio Oil & Gás Expo and Conferência, Rio de Janeiro.
- Nasr-El-Din, H.A. and Al-Taq, A.A., 1998, Water Quality Requirements and Restoring the Injectivity of Waste Water Disposal, SPE 39487, SPE International Symposium on Formation Damage Control, Lafayette.
- Ochi, J., Detienne, J. L., Rivet, P. and Lacourie, Y., 1999, External Filter Cake Properties During Injection of Produced Waters, SPE 54773, SPE European Formation Damage Conference, The Hague.
- Okandan, F., Gümrah, F. and Demiral, B., 2000, Pollution of Aquifer by Produced Oil Field Water, Energy Sources, 23, pg 327-336, 2000.
- Paige, R. W., 1995, Optimising Water Injection Performance, SPE 29774, Middle East Oil Show, Bahrain, 11-14 March.
- Pang, S. and Sharma, M.M., 1994, A Model For Predicting Injectivity Decline In Water Injection Well, SPE 28489, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans.

- Ria, R.R.S., Fitnawn, E.A. and Singh, K., 2002, Designing an Injection Program of Produced Water Injection in Mature Fields, SPE 77837, SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Melbourne.
- Rodrigues, E. R., 2001, Declínio de Injetividade Devido à Injeção de Água do Mar/Produzida: Estudo Matemático, Laboratorial e de Campo, Tese de mestrado em engenharia de reservatório e exploração de petróleo, Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF-LENEP), Macaé.
- Russell, C.S. and Hazlett, W.G., 1996, Injection of Oil Field Producer Water into Water Aquifers – The Ojo Alamo Project, SPE 35876, International Conference on Health, Safety & Environment, New Orleans.
- Sharma, M.M. and Pang, S., 1997, Injectivity Decline in Water Injection Well: An Offshore Gulf of Mexico Case Study, SPE 38180, SPE European Formation Damage Conference, The Hague.
- Shecaria, F. S., Siqueira, A. G, Bedrikovetsky, P et al, 2001, Modelagem da Injetividade de Água, Relatório Interno do CENPES (Projeto 03.03.41), Rio de Janeiro, 2001.
- Siqueira, A. G., 2000, Modelagem em Rede 3D do Escoamento de Fluidos Particulados em Meios Porosos, Tese (mestrado em engenharia de Reservatório), Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas.
- Tebaldi de Castro, J.F., Costa Bastos, E. and Hiromi Shioya, N., 1998, Evolution of Produced Water Treatment in Campos Basin, SPE 46580, International Conference on Health, Safety & Environment, Caracas.
- Tein, C. and Payatakes, A. C., 1979, Advances in Deep-Bed Filtration, AIChE Journal 25(9), pg. 737 to 759.
- Trank, T. K., 1998, Permeability Decrease Of Sandstone As A Result Of Oil And Solids Containing Water, Thesis, Delft University of Technology, Sub faculty of Applied Earth Sciences, Netherlands.
- Ukpohor, T. O., 2001, Produced Water: Environmental Issues/ Technological Solution Of The Nigeria Depletion Era, SPE 71437. International Association of Oil & Gas Producers, 2000, Guidelines of Produced Water Injection. OGP Report N 2.80/302.

- Van den Broek, M.G.T., Bruin, J.N., Tran, T.K., Van der Zande, Van der Meulen, 1999, Core-flow experiments with oil and solids containing water, SPE 54769, 1999 SPE European Formation Damage Conference, The Hague, 31 May - 1 June.
- Wennberg, K.E. and Sharma, M.M., 1997, Determination of The Filtration Coefiente and The Transition Time for Water Injection Well, SPE 38181, SPE European Formation Damage Conference, The Hague.
- Zhang, N.S., Somerville, J.M. and Todd, 1993, An Experimental Investigation of the Formation Damage Caused by Produced Oily Water Injection, SPE 26702, Offshore European Conference, Aberdeen, Sept 7-10
- Van der Zwaag, C. and Øyno L, 1996, Produced Water 2, Environmental Issues and Mitigation Technologies, pg 521 to 532, M. Reed and Johnsen, Plenum Press, New York, 1996.

## 11 Apêndice A. Modelo Linear para Filtração Profunda

O modelo linear 1-D para filtração profunda é dado por:

$$f \frac{\partial c}{\partial t} + U \frac{\partial c}{\partial x} = - \frac{\partial s}{\partial t} \quad (\text{A-1})$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} = I(s) U c \quad (\text{A-2})$$

$$U = - \frac{k_0 k(s)}{m} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (\text{A-3})$$

Aqui uma forma hiperbólica é assumida para a função de dano de formação  $k$

:

$$k(s) = \frac{1}{1 + bs} \quad (\text{A-4})$$

São introduzidas variáveis adimensionais espaço e tempo

$$X = \frac{x}{L}; \quad T = \frac{Ut}{\Phi L} \quad (\text{A-5})$$

O sistema de equações que define a filtração profunda (A-1)-(A-3) pode ser descrito em variáveis adimensionais da seguinte forma:

$$\frac{\partial c}{\partial T} + \frac{\partial c}{\partial X} = - I c \quad (\text{A-6})$$

$$\frac{\partial s}{\partial T} = I(s) L f c \quad (\text{A-7})$$

$$U = - \frac{k_0 k(s)}{m} \frac{\partial p}{\partial X} \quad (\text{A-8})$$

A condição inicial para o sistema (A-6), (A-7), (A-8) corresponde à ausência de partículas no médio poroso antes da injeção:

$$T=0: \quad c = 0; \quad s = 0 \quad (\text{A-9})$$

A condição de contorno para o sistema (A-6), (A-7), (A-8) corresponde à injeção de fluidos com uma concentração de partícula sólida especificada.

$$X=0: \quad c = c_m \quad (\text{A-10})$$

Se o coeficiente de filtração é constante,  $\lambda_0$ , a solução do problema (A-6)-(A-10) para  $X < T$  é:

$$\sigma(X, T) = \lambda_0 L \phi c_m (T-X) \exp(-\lambda_0 LX); \quad (\text{A-11})$$

$$c(X, T) = c_m \exp(-\lambda_0 LX) \quad (\text{A-12})$$

Para  $X > T$ , além da frente  $X = T$ , as concentrações de  $c$  e  $s$  são nulas.

Integrando em  $X$  o gradiente de pressão de (A-8), e substituindo a solução (A-11) no resultado, obter-se uma expressão para a função de impedância  $J$  que é o inverso de injetividade:

$$J(T) = \frac{k_0}{k(T)} = \frac{k_0 \Delta p(T)}{\mu L U(T)}; \quad (\text{A-13})$$

$$J(T) = 1 + \beta \phi c_m \left( T(1 - \exp(-\lambda_0 L)) + \exp(-\lambda_0 L) + \frac{\exp(-\lambda_0 L) - 1}{\lambda_0 L} \right) \quad (\text{A-14})$$

A característica mais importante da fórmula (A-14) é uma dependência linear do tempo:

$$J(T) = 1 + mT + \delta, \quad , \quad m = \beta \phi c_m (1 - \exp(-\lambda_0 L)) \quad (\text{A-15})$$

$$\delta = \beta \phi c_m \left( \exp(-\lambda_0 L) + \frac{\exp(-\lambda_0 L) - 1}{\lambda_0 L} \right) \quad (\text{A-16})$$

Aqui  $m$  está a inclinação da reta de  $J(T)$  no plano  $(T, J)$  (Fig. A-1).

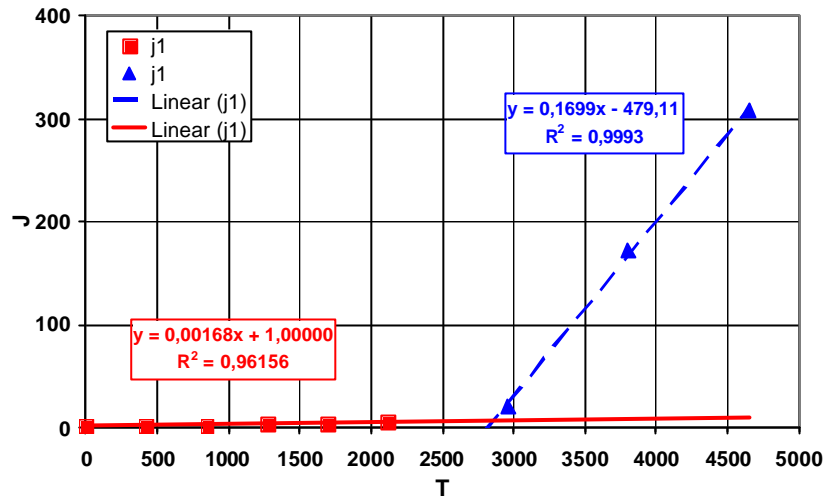


Figura A-1: Exemplo das inclinações das retas  $m$  e  $m_c$ .

Normalmente o parâmetro  $\delta$  não excede  $10^{-3}$ , assim a reta  $J(T)$  começa em  $J=1$  no momento  $T=0$ , o que permite simplificar a fórmula para impedância

$$J(T) = 1 + m T \quad (\text{A} - 17)$$

A equação (A-17) é válida para  $T > 1$ , quando a frente de concentração já chegou ao fim da amostra.

Equação (A-14) mostra que a queda de injetividade durante filtração profunda depende de dois parâmetros de adimensionais:  $\lambda_0 L$  e  $\beta \phi c_m$ .

## 12 Apêndice B. Tempo de Transição

A filtração profunda cessa e a formação do reboco externo começa no  $T_{tr}$  (tempo de transição). Para  $T > T_{tr}$ , a concentração depositada  $\sigma$  não muda com o tempo e é determinado através da equação (A-11) com  $T$  substituído por  $T_{tr}$ .

O tempo de transição é definido como o tempo necessário para a deposição na entrada da amostra  $\sigma(0, T_{tr})$  alcançar uma certa fração  $\alpha$  da porosidade. A expressão para a concentração da deposição no início da amostra em  $\sigma(0, T)$  pode ser obtida de (A-11). Esta expressão permite calcular o tempo de transição  $T_{tr}$ :

$$s(0, T) = I_0 L c_m f T \quad (B-1)$$

$$T_{tr} = \frac{\alpha}{I_0 L c_m} \quad (B-2)$$

Neste caso  $\alpha$  é a parte de porosidade que foi preenchida pelas partículas depositadas e impede a penetração adicional de partículas no *core*. Wennberg K.E. e Sharma M.M.(1997) recomendam que se use  $\alpha=0.5$ .



### 13 Apêndice C. Modelo Linear para Formação Reboco

Depois do tempo de transição, um reboco externo com  $k_c$  de permeabilidade e porosidade  $\phi_c$  é formado. Para  $T > T_{tr}$ , o reboco cresce a taxa constante que é determinada pela concentração de partículas capturadas pelo reboco:

$$(1-f_c)h_c(t) = c_m U(t-t_{tr}) \quad (C-1)$$

A espessura  $h_c$  do reboco externo é zero para  $t < t_{tr}$ .

A permeabilidade média  $k(T)$  total é igual à média harmônica dos dois condutores seqüenciais - o reboco externo e a amostra com partículas depositadas:

$$\frac{h_c + L}{k(T)} = \frac{h_c}{k_c} + \frac{L}{k(T_{tr})} \quad (C-2)$$

Aqui  $k(T)$  é determinado através de fórmula (C-2) para  $T > T_{tr}$ . Depois do tempo de transição, a permeabilidade média da amostra não muda, portanto  $k(T_{tr}) = k_0 / J(T_{tr})$  é a permeabilidade média no tempo de transição e pode ser determinada através das fórmulas (A-13) e (A-15).

Assumindo que o reboco é fino,  $h_c \ll L$ , de (C-1) e (C-2) obtém-se uma expressão para queda de permeabilidade de maneira similar a (A-15):

$$\frac{k(T_{tr})}{k(T)} = \frac{k(T_{tr}) \Delta p(T)}{mLU(T)}; \quad (C-3)$$

$$\frac{k(T_{tr})}{k(T)} = 1 + \frac{k(T_{tr}) c_m f}{k_c (1-f_c)} (T - T_{tr}) \quad (C-4)$$

A expressão para a função de impedância (o inverso da função de injetividade), como se deduz de (C-3),(C-4), para  $T > T_{tr}$ , é:

$$J(T) = \frac{k_0}{k(T)} = \frac{k_0 \Delta p(T)}{mLU(T)} = J(T_{tr}) \left( 1 + \frac{k_0 c_m f}{k_c J(T_{tr}) (1-f_c)} (T - T_{tr}) \right) \quad (C-5)$$

O declínio da injetividade durante a formação do reboco externo depende do parâmetro adimensional

$$\frac{k_0 c_{in} \phi}{k_c (1 - \phi_c)} \quad (C-6)$$

Que é a inclinação da função  $J(T)$  para  $T > T_{tr}$ .

## 14 Apêndice D Cálculos Feitos em Planilha Eletrônica.

Os dados foram fornecidos com gráficos de permeabilidade entre cada seção da amostra como pode ser visto na figura 1.

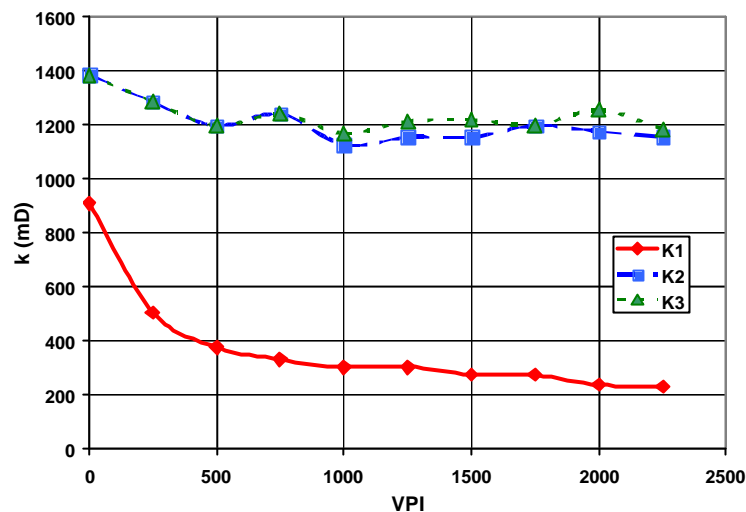


Figura D.1: Curvas de queda permeabilidade originais para cada seção da amostra.

A partir dos dados de permeabilidade medido em cada seção da amostra,  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  foi determinado o  $\Delta P$  de cada seção utilizando a seguinte expressão derivada da lei de Darcy:

$$\Delta P_i = \frac{Qm\Delta l_i}{k_i A} \quad (D-1)$$

Foi obtida uma tabela de  $\Delta P$  versus VPI para cada segmento da amostra. O  $\Delta P_i$  efetivo para cada comprimento do início da amostra até cada ponte de tomada de pressão ( $\Delta P_e$ ) foi definido com:

$$\Delta P_{ei} = \sum \Delta P_i \quad (D-2)$$

Então foram recalculadas as permeabilidades  $K_i$  para cada sub-amostra a partir deste novo  $\Delta P_{ei}$ :

$$K_i = \frac{Q_m \sum (\Delta l_i)}{A \Delta P e_i} \quad (D - 3)$$

Onde  $\Delta l_i$  é cada uma das distâncias entre sensores da amostra na figura D.2 é mostrado o gráfico do resultado.

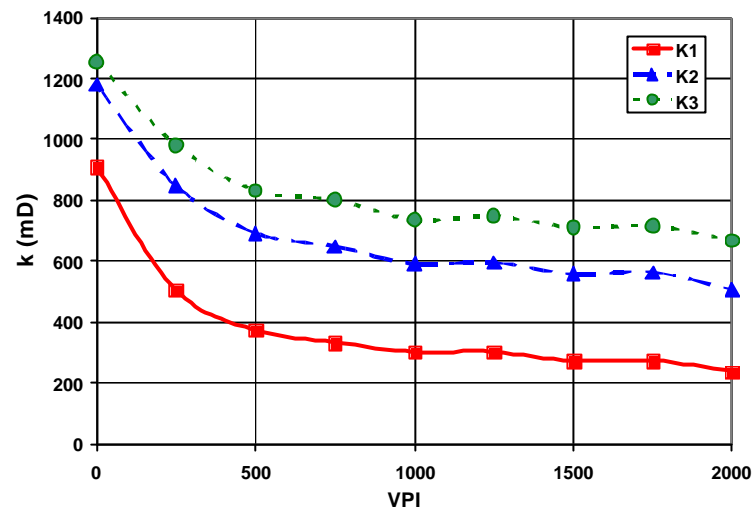


Figura D.2: Curvas de perda de injetividade para cada sub-amostra.

A seguir foi calculado o volume poroso injetado em cada sub-amostra através da expressão:

$$T_i = \frac{T}{w_i} \quad (D-4)$$

Onde  $T$  são volumes porosos injetados e  $w_i$  é fração do comprimento da sub-amostra pelo comprimento total.

A seguir é feita a inversão relativa da permeabilidade para cada curva  $K_i$ :

$$J_i = \frac{K_i}{K_{i_0}} \quad (D-5)$$

Na figura D.3 pode ser visto o resultado.

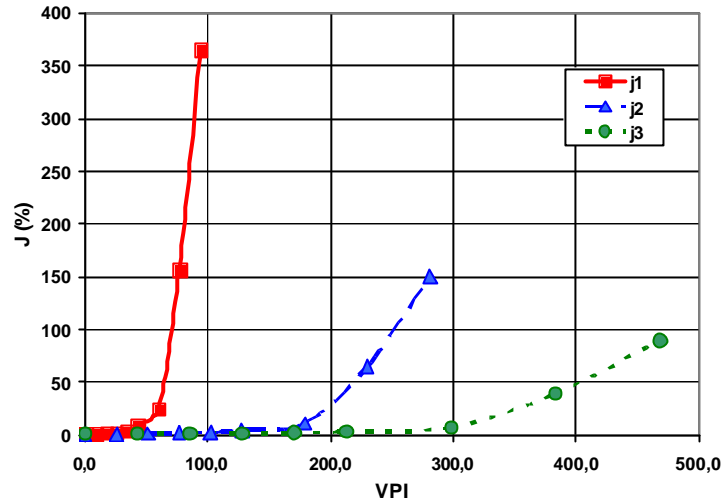


Figura D.3: Curvas de impedância para cada sub-core.

Então é feito o gráfico de \$J\_i\$ por \$T\_i\$ para cada \$J\_i\$ e ajustado para duas retas o ponto de encontro das duas retas é o \$T\_{tri}\$, como pode ser visto na figura D.4.

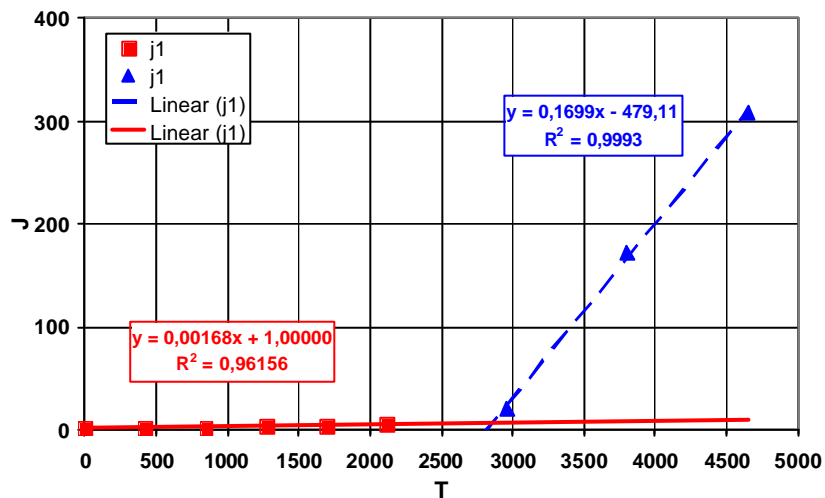


Figura D.4: Exemplo da determinação do \$T\_{tr}\$ e das retas \$m\_i\$ e \$m\_{ci}\$.

Do mesmo gráfico são obtidas as inclinações das retas \$m\_i\$ e \$m\_{ci}\$ que são as inclinações da filtração profundo e da formação do reboco. De posse destas informações é possível determinar a função que relaciona \$\lambda\$ e \$\beta\$:

$$b_i = \frac{m_i}{(cf(1 - e^{-Lw_1 I_i}))} \quad (D-6)$$

Onde  $c$ (ppm) é a concentração de partículas e  $\phi$  é a porosidade da amostra e  $L$ (m) é o seu comprimento.

Para cada inclinação  $\eta$  teremos uma curva de  $\lambda$  e  $\beta$ , a interseção destas curvas são o campo de soluções para as duas variáveis como mostrado na figura 5:

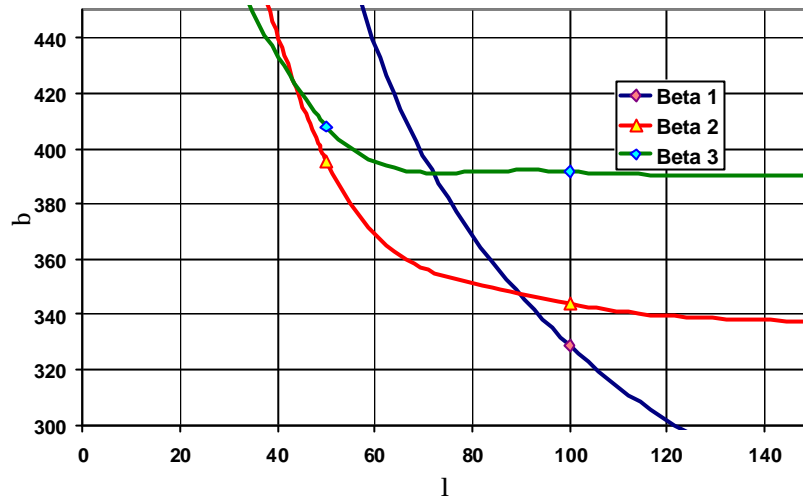


Figura D.5: Exemplo da determinação dos resultados de  $\lambda$  e  $\beta$ .

Tem-se então 3 valores para  $\lambda$  e 3 para  $\beta$ , para cada valor de  $\lambda$  podemos calcular o valor de  $\alpha$  a ele associado através da equação D-7:

$$a_i = I_i T_{tr} L w_i \quad (D-7)$$

Finalmente é calculada a permeabilidade do reboco  $k_{ci}$  para cada inclinação encontrada através da equação D-8:

$$k_{ci} = \frac{K_{i0} L f}{m_{ci} (1 - f_c)} \quad (D-8)$$

## 15 Apêndice E Dedução da equação 4.13

Considerando que a impedância pode ser descrita com:

$$J = 1 + mT \quad (\text{E-1})$$

Onde  $m$  é:

$$m = cfb(1 - e^{-I_L}) \quad (\text{E-2})$$

Para o caso de injeção somente de partículas sólidas ou apenas partículas líquidas tem-se:

$$m_s = c_s f b_s (1 - e^{-I_{sL}}) \quad (\text{E-3})$$

$$m_L = c_L f b_L (1 - e^{-I_{LL}}) \dots \dots \dots (\text{E-4})$$

$$m_{s+L} = c_{s+L} f b_{s+L} (1 - e^{-I_{s+LL}}) \quad (\text{E-5})$$

Consideram-se que o efeito da injeção simultânea de partículas sólidas e líquidas e a soma dos efeitos individuais descritos em E-3 e E-4, e que  $\lambda$  é independente do tipo de partícula e finalmente, que a concentração da mistura é a soma das concentrações:

$$m_{s+L} = m_s + m_L \quad (\text{E-6})$$

$$I_s = I_L = I_{s+L} \dots \dots \dots (\text{E-7})$$

$$c_{s+L} = c_s + c_L \quad (\text{E-8})$$

Introduzindo E-3, E-4 e E-5 em E-6 e também E-7 e E-8 obtém-se:

$$(c_s + c_L) f b_{s+L} (1 - e^{-I_{sL}}) = c_s f b_s (1 - e^{-I_{sL}}) + c_L f b_L (1 - e^{-I_{sL}}) \quad (\text{E-9})$$

$$b_{s+L} = \frac{c_s b_s + c_L b_L}{(c_s + c_L)} \dots \dots \dots (\text{E-10})$$

$$b_{l+s} = \frac{(b_l (c_l / c_s) + b_s)}{(c_l / c_s) + 1} \dots \dots \dots (\text{E-11})$$

Que é a equação 4.9 anteriormente descrita.

## 16 Apêndice F. Tabelas de Resultados

Test	m1	m2	m3	m	l (1/m)	l (1/m)	l (1/m)	l1-2 (1/m)	l (1/m)	b1	b2	b3	b1-2	b
T4.08	0,0022	0,0026	0,0023	0,0024	137	260		198,5	198,5	194	171		182,5	182,5
T4.09	0,0019	0,0026	0,0026	0,0024	98	103	217	100,5	139,3	198	193	193	195,5	194,7
T4.10	0,0017	0,0019	0,0020	0,0019	164	133	66	148,5	121	117	126	127	121,5	123,3
T4.11	0,0012	0,0015	0,0015	0,0014	48	120		84	84	219	127		173	173
T4.12	0,0002	0,0004	0,0004	0,0003	52,4	87,3	71,8	69,85	70,5	69,5	64,6	63,6	67,05	65,9
T4.13	0,0010	0,0011	0,0013	0,0011	165	124,5	52,5	144,75	114	173,8	193,4	200	183,6	189,1
Average	0,0014	0,0017	0,0017	0,0016	110,73	137,97	101,83	124,35	121,2	161,9	145,8	145,9	153,9	154,7

Tabela F.1 Testes do grupo 4 resultados para  $m, \lambda$  e  $\beta$ .

Test	mc1	mc2	mc3	mc	a1	a2	a3	a1-2	a	kc1 (mD)	kc2 (mD)	kc3 (mD)	kc (mD)
T4.08	0,1161	0,1257	0,1117	0,1178	0,211	0,403		0,307	0,307	0,123	0,119	0,047	0,096
T4.09	0,0760	0,0960	0,0920	0,0880	0,141	0,149	0,314	0,145	0,201	0,251	0,250	0,253	0,251
T4.10	0,1699	0,1810	0,1834	0,1781	0,369	0,289	0,143	0,329	0,267	0,167	0,166	0,166	0,166
T4.11	0,0188	0,0221	0,0224	0,0211	0,113	0,284	0,000	0,198	0,132	0,666	0,665	0,667	0,666
T4.12					0,099	0,108	0,135	0,103	0,114				
T4.13	0,0499	0,0499	0,0519	0,0506	0,083	0,063	0,027	0,073	0,057	0,232	0,258	0,232	0,240
Average	0,0861	0,0949	0,0923	0,0911	0,1609	0,1785	0,124	0,170	0,154	0,288	0,292	0,273	0,284

Tabela F.2 Testes do grupo 4 resultados para  $m_c, \alpha$  e  $k_c$ .

Test	m1	m2	m3	m	l1 (1/m)	l2 (1/m)	l3 (1/m)	l1-2 (1/m)	l (1/m)	b1	b2	b3	b1-2	b
T5.1	0,0004	0,0005	0,0005	0,0005	86	100		93	93	603	558		580,5	580,5
T5.2	0,0004	0,0006	0,0006	0,0005	68	64	54	65,85	61,77	650	682	698	666	676,7
T5.3	0,0003	0,0006	0,0007	0,0005	39	36	30	37,45	35	833	897	933	865	887,7
T5.4	0,0005	0,0007	0,0008	0,0007	83	72	52	77,7	69,27	807	867	895	837	856,3
T5.5	0,0006	0,0008	0,0009	0,0007	118	88	44	103	83,33	841	970	1042	905,5	951
T5.6	0,0001	0,0002	0,0002	0,0001	61	72	210	66,5	114,3	185	168	168	176,3	173,5
T5.7	0,0010	0,0012	0,0014	0,0012	141	103	45	122	96,33	677	790	848	733,5	771,7
T5.8	0,0002	0,0002	0,0003	0,0002	152	103	40	127,5	98,33	335	394	436	364,5	388,3
T5.9	0,0003	0,0004	0,0004	0,0004	89	73	43	81	68,33	348	392	423	369,8	387,5
T5.10	0,0003	0,0003	0,0004	0,0003	147	103	42	124,75	97,17	187	219	237	203	214,3
T5.11	0,0013	0,0014	0,0014	0,0014	166	163	118	164,5	149	647	650	649	648,3	648,6
T5.12	0,0001	0,0002	0,0002	0,0002	81	124		102,5	102,5	398	247		322,5	322,5
Average	0,0004	0,0006	0,0006	0,0006	102,6	91,7	67,8	97,1	89,0	543	569	633	556	572

Tabela F.3 Testes do grupo 5A e 5B resultados para  $m, \lambda$  e  $\beta$ .



Test	mc1	mc2	mc3	mc	a1	a2	a3	a1-2	a	kc1 (mD)	kc2 (mD)	kc3 (mD)	kc (mD)
T5.1	0,0016	0,0026	0,0030	0,0024	0,014	0,015		0,0144	0,014	0,091	0,094	0,095	0,093
T5.2	0,0029	0,0042	0,0046	0,0039	0,012	0,011	0,009	0,0111	0,010	0,101	0,101	0,102	0,101
T5.3	0,0055	0,0091	0,0104	0,0083	0,003	0,002	0,002	0,0025	0,002	0,041	0,041	0,041	0,041
T5.4	0,0248	0,0329	0,0353	0,0310	0,009	0,008	0,006	0,0084	0,007	0,015	0,015	0,015	0,015
T5.5	0,0317	0,0336	0,0344	0,0332	0,014	0,010	0,005	0,0119	0,010	0,015	0,015	0,015	0,015
T5.6	0,0177	0,0200	0,0208	0,0195	0,013	0,015	0,044	0,0139	0,024	0,018	0,018	0,018	0,018
T5.7	0,0508	0,0510	0,0511	0,0510	0,021	0,015	0,007	0,0177	0,014	0,027	0,027	0,027	0,027
T5.8					0,070	0,047	0,018	0,0583	0,045				
T5.9					0,076	0,061	0,036	0,069	0,058				
T5.10					0,124	0,087	0,036	0,1056	0,082				
T5.11	0,0024	0,0029	0,0030	0,0028	0,074	0,072	0,053	0,0729	0,066	0,750	0,722	0,731	0,734
T5.12					0,028	0,043		0,0352	0,035				
Average	0,0172	0,0195	0,0203	0,0190	0,038	0,032	0,021	0,035	0,031	0,132	0,129	0,131	0,131

Tabela F.4 Testes do grupos 5A e 5B resultados para  $m_c, \alpha$  e  $k_c$ 

Test	K1	K2	K3	K	Tt1	Tt2	Tt3	Q (l/h)	VPI	Cs	Ds	$f_{core}$	r
T4.08	1084	1172	1041	1099	2430	813	481	4	580	50	7,0	26,9	0,055
T4.09	1250	1576	1619	1482	2270	760	455	4	633	50	7,0	26,9	0,047
T4.10	1541	1642	1663	1615	2950	950	470	4	775	60	5,0	26,9	0,032
T4.11	910	1068	1077	1018	4110	1380	830	4	1403	45	3,0	26,9	0,024
T4.12	1059	1300	1270	1209				4	1160	24	4,0	26,9	0,030
T4.13	1576	1576	1641	1598	1650	550	332	4	270	24	7,0	26,9	0,045
T5.1	142	239	277	219	2520	790	455	4	1200	5	11,0	18,0	0,158
T5.2	286	416	457	386	2675	880	525	7	1200	5	11,0	18,0	0,119
T5.3	219	362	416	332	1040	340	205	10	350	5	11,0	18,0	0,128
T5.4	367	485	548	467	1710	570	337	4	500	5	16,0	18,0	0,157
T5.5	474	499	509	494	1820	610	366	5	500	5	16,0	18,0	0,153
T5.6	317	357	373	349	3290	1093	658	10	650	5	16,0	18,0	0,182
T5.7	676	678	678	677	1145	380	230	3	10	10	16,0	18,0	0,130
T5.8	1407	1545	1575	1509				7	2000	3	11,0	22,0	0,066
T5.9	909	1179	1254	1114				5	2250	5	11,5	22,0	0,081
T5.10	1337	1334	1407	1359				3	1333	10	16,0	22,0	0,102
T5.11	720	837	865	807	3500	1160	700	3	2000	10	6,0	22,0	0,050
T5.12	666	722	734	707				3	1500	3	6,0	22,0	0,053
Average	788	890	922	866	2401	791	464	5	1069	14	10	21	0

Tabela F.5 Testes de todos os grupos resultados para  $k, T_{tr}, Q, VPI, C_s, D_s, \phi_{amostra}$  e  $\rho$ .

Test	K	Q (l/h)	Cs	Ds	$f_c$	r	R
T4.08	1099	4	50	7,0	26,9	0,055	2,7
T4.09	1482	4	50	7,0	26,9	0,047	2,4
T4.10	1615	4	60	5,0	26,9	0,032	1,9
T4.11	1018	4	45	3,0	26,9	0,024	1,1
T4.12	1209	4	24	4,0	26,9	0,030	0,7
T4.13	1598	4	24	7,0	26,9	0,045	1,1
Media	1337	4	42,2	5,5	26,9	0,039	1,7

Tabela F.6 Testes do grupo 4 cálculo de P.

Test	K	Q (l/h)	Cs	Ds	f <sub>c</sub>	r	R
T5.1	219	4	5	11,0	18,0	0,158	0,8
T5.2	386	7	5	11,0	18,0	0,119	0,6
T5.3	332	10	5	11,0	18,0	0,128	0,6
T5.4	467	4	5	16,0	18,0	0,157	0,8
T5.5	494	5	5	16,0	18,0	0,153	0,8
T5.6	349	10	5	16,0	18,0	0,182	0,9
T5.7	677	3	10	16,0	18,0	0,130	1,3
T5.8	1509	7	3	11,0	22,0	0,066	0,2
T5.9	1114	5	5	11,5	22,0	0,081	0,4
T5.10	1359	3	10	16,0	22,0	0,102	1,0
T5.11	807	3	10	6,0	22,0	0,050	0,5
T5.12	707	3	3	6,0	22,0	0,053	0,2
Media	701,8	5,3	5,92	12,3	19,67	0,115	0,67

Tabela F.7 Testes dos grupos 5A e 5B, cálculo de P.

Test	mc1	mc2	mc3	mc	a1	a2	a3	a1-2	a	kc1 (mD)	kc2 (mD)	kc3 (mD)	kc (mD)
T4.08	0,1161	0,1257	0,1117	0,1178	0,211	0,403		0,307	0,307	0,167	0,139	0,054	0,120
T4.09	0,0760	0,0960	0,0920	0,0880	0,141	0,149	0,314	0,145	0,201	0,295	0,294	0,296	0,295
T4.10	0,1699	0,1810	0,1834	0,1781	0,369	0,289	0,143	0,329	0,267	0,195	0,195	0,195	0,195
T4.11	0,0188	0,0221	0,0224	0,0211	0,113	0,284	0,000	0,198	0,132	0,781	0,780	0,776	0,779
T4.12					0,099	0,108	0,135	0,103	0,114				
T4.13	0,0499	0,0499	0,0519	0,0506	0,083	0,063	0,027	0,073	0,057	0,232	0,258	0,232	0,240
Average	0,0861	0,0949	0,0923	0,0911	0,1609	0,1785	0,124	0,170	0,154	0,334	0,333	0,311	0,326

Tabela F.8 Testes do grupo 4 resultados para m<sub>c</sub>, α e k<sub>c</sub>

Test	mc1	mc2	mc3	mc	a1	a2	a3	a1-2	a	kc1 (mD)	kc2 (mD)	kc3 (mD)	kc (mD)
T5.1	0,0016	0,0026	0,0030	0,0024	0,014	0,015		0,014	0,014	0,107	0,110	0,111	0,109
T5.2	0,0029	0,0042	0,0046	0,0039	0,012	0,011	0,009	0,011	0,010	0,118	0,119	0,119	0,119
T5.3	0,0055	0,0091	0,0104	0,0083	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,048	0,048	0,048	0,048
T5.4	0,0248	0,0329	0,0353	0,0310	0,009	0,008	0,006	0,008	0,007	0,018	0,018	0,018	0,018
T5.5	0,0317	0,0336	0,0344	0,0332	0,014	0,010	0,005	0,012	0,010	0,018	0,018	0,018	0,018
T5.6	0,0177	0,0200	0,0208	0,0195	0,013	0,015	0,044	0,014	0,024	0,022	0,021	0,022	0,021
T5.7	0,0508	0,0510	0,0511	0,0510	0,021	0,015	0,007	0,018	0,014	0,032	0,032	0,032	0,032
T5.8					0,070	0,047	0,018	0,058	0,045				
T5.9					0,076	0,061	0,036	0,069	0,058				
T5.10					0,124	0,087	0,036	0,106	0,082				
T5.11	0,0024	0,0029	0,0030	0,0028	0,074	0,072	0,053	0,073	0,066	0,880	0,847	0,847	0,858
T5.12					0,028	0,043	0,000	0,035	0,023				
Average	0,0172	0,0195	0,0203	0,0190	0,038	0,032	0,020	0,035	0,030	0,155	0,152	0,152	0,153

Tabela F.9 Testes do grupo 5A e 5B resultados para m<sub>c</sub>, α e k<sub>c</sub>

Test	m1	m2	m3	m	l1 (1/m)	l2 (1/m)	l3 (1/m)	l1-2 (1/m)	l (1/m)	b1	b2	b3	b1-2	b
T5.14	4.E-05	5.E-05	5.E-05	4.E-05	123,0	92,0	56,0	107,5	90,33	2,5	2,9	3,0	2,7	2,8
T5.15	0,0001	0,0001	0,0002	0,0001	47,0	34,0	20,0	40,5	33,67	2,7	3,9	5,3	3,3	3,9667
T5.16	0,0001	0,0001	0,0002	0,0001	53,5	39,0	19,5	46,25	37,33	1,8	2,6	3,3	2,16	2,54
T5.17	0,0001	0,0001	0,0002	0,0001	43,0	34,5	20,0	38,75	32,5	10,2	12,7	14,2	11,45	12,367
T5.18	0,0001	0,0001	0,0002	0,0001	38,0	32,8	24,5	35,4	31,77	11,0	12,5	13,5	11,75	12,333
T5.19	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	47,0	38,5	20,0	42,75	35,17	5,5	7,2	8,4	6,35	7,0333
T5.21	0,0001	0,0002	0,0003	0,0002	47,0	20,0		33,5	33,5	3,0	5,9		4,45	4,45
T5.22	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	168,0	114,0	47,0	141	109,7	4,8	5,5	5,8	5,15	5,35
T5.23	0,0000	0,0001	0,0001	0,0001	39,3	30,0	20,0	34,65	29,77	11,5	14,3	15,3	12,9	13,7
T5.24	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	158,5	151,4		154,95	155	40,3	40,8		40,55	40,55
T5.25	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	61,0	58,0	53,0	59,5	57,33	10,1	10,4	10,6	10,25	10,367
Average	0,0001	0,0001	0,0002	0,0001	75,0	58,6	31,1	66,8	58,7	9,4	10,8	8,8	10,1	10,5

β.  
Tabela F.10 Testes com injeção de partículas líquidas, resultados para m, λ e

Test	a1	a2	a3	a1-2	a
T5.14	1,953	1,460	0,730	1,706	1,381
T5.15	3,062	2,215	1,303	2,639	2,193
T5.16	4,077	2,972	1,486	3,524	2,845
T5.17	0,655	1,577	0,305	1,116	0,846
T5.18	0,579	1,500	0,373	1,039	0,817
T5.19	0,609	0,499	0,259	0,554	0,456
T5.21	1,611	0,686	0,000	1,148	0,766
T5.22	2,176	1,477	0,609	1,827	1,421
T5.23	0,285	0,217	0,145	0,251	0,216
T5.24	2,114	2,019		2,066	2,066
T5.25	0,813	1,094	0,333	0,954	0,747
Average	1,630	1,429	0,554	1,529	1,250

Tabela F.11 Testes com injeção de partículas líquidas, resultados para α.

Test	K	Q (l/h)	Co	Do	f <sub>c</sub>	r	R
T5.14	594,33	3	100,0	6,0	18,0	0,052	5,2
T5.15	749	3	300,0	6,0	18,0	0,047	14,0
T5.16	713	3	500,0	6,0	18,0	0,048	23,8
T5.17	588,47	3	100,0	18,0	18,0	0,157	15,7
T5.18	657	3	100,0	26,0	18,0	0,215	21,5
T5.19	1498,3	3	100,0	6,0	22	0,0364	3,6352
T5.20	1181,3	3	300,0	51,0	22	0,348	104,4
T5.22	714	3	100,0	6,0	22	0,0527	5,266
T5.23	1293,3	3	50,0	6,0	22	0,0391	1,9564
T5.24	835	3	50,0	6,0	22	0,0487	2,4348
T5.25	984	3	50,0	6,0	22	0,0449	2,2429
Media	891,6	3,0	159,09	13,0	20,18	0,099	18,20

Tabela F.12 Dados dos testes com injeção de partículas líquidas.

Test	m1	m2	m3	m	l (1/m)	l (1/m)	l (1/m)	l1-2 (1/m)	l (1/m)	b1	b2	b3	b1-2	b
T4.15	0.0024	0.0029	0.0030	0.0028	128.7	127	110.6	127.85	122.1	30.87	31.07	31.1	30.97	31.01
T4.16	0.0043	0.0057	0.0057	0.0052	107	110	210	108.5	142.3	75.6	74.4	74.5	75	74.83
T4.17	0.0012	0.0013	0.0015	0.0013	195	139	57	167	130.3	16.04	18	18.03	17.02	17.36
T4.18	0.0002	0.0004	0.0005	0.0004	66	53	33	59.5	50.67	5.56	6.6	7.5	6.08	6.553
T4.19	0.0013	0.0014	0.0016	0.0014	172.5	125.5	50	149	116	17.5	19.5	20.3	18.5	19.1
T4.D1	0.0013	0.0019	0.0019	0.0017	92.2	91.4	87.5	91.8	90.37	19.4	19.55	19.5	19.48	19.48
T4.D2	0.0007	0.0008	0.0009	0.0008	170	136	59	153	121.7	8.7	10.1	10.1	9.4	9.633
T4.D3	0.0005	0.0003	0.0005	0.0004			14		14	0	5.05	8.2		4.417
Average	0.0015	0.0018	0.0019	0.0018	133.06	111.7	86.729	122.38	110.5	24.81	25.6	25.86	25.21	22.8

Tabela F.13 Dados dos testes do grupo 4 resultados para m, λ e β.com injeção de partículas líquidas e sólidas.

Test	m1	m2	m3	m	l1 (1/m)	l2 (1/m)	l3 (1/m)	l1-2 (1/m)	l (1/m)	b1	b2	b3	b1-2	b
T5.27	3.E-05	0,0001	0,0001	0,0001	38,5	35,0	28,5	36,75	34	2,3	2,6	2,9	2,5	2,6
T5.28	0,0001	0,0002	0,0003	0,0002	38,5	37,3	35,4	37,9	37,07	4,3	4,5	4,7	4,4	4,5
T5.29	0,0001	0,0002	0,0002	0,0002	47,0	36,5	8,5	41,75	30,67	9,3	15,4	29,3	12,4	18,0
T5.30	0,0001	0,0002	0,0002	0,0002	30,5	26,8	21,5	28,65	26,27	13,3	14,8	16,4	14,1	14,8
T5.31	0,0024	0,0045	0,0054	0,0041	47,2	44,1	39,0	45,65	43,43	78,2	82,4	83,2	80,3	81,27
T5.32	0,0001	0,0003	0,0005	0,0003	20,8	19,8	17,5	20,3	19,37	6,8	9,8	16,0	8,3	10,9
T5.33	0,0005	0,0008	0,0009	0,0007	22,2	22,1	21,9	22,135	22,05	10,7	11,7	12,5	11,2	11,6
T5.34	0,0009	0,0015	0,0021	0,0015	22,1	21,4	19,1	21,71	20,84	22,0	32,0	53,0	27,0	35,7
T5.35	0,0150	0,0170	0,0200	0,0173	185,0	120,0	47,0	152,5	117,3	250,0	290,0	325,0	270,0	288,3
T5.36	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	100,0	75,0	41,0	87,5	72	1,5	2,0	2,5	1,7	2,0
T5.37	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	77,0	72,5	57,0	74,75	68,83	1,9	2,0	2,0	1,9	1,9
Average	0,0018	0,0023	0,0027	0,0023	57,2	46,4	30,6	51,8	44,7	36,4	42,5	49,8	39,4	42,9

Tabela F.14 Dados dos testes do grupo 5 resultados para  $m, \lambda$  e  $\beta$ . com injeção de partículas líquidas e sólidas.

Test	mc1	mc2	mc3	mc	a1	a2	a3	a1-2	a	kc1 (mD)	kc2 (mD)	kc3 (mD)	kc (mD)
T4.15	0,1269	0,1444	0,1427	0,1380	1,433	1,414	1,234	1,423	1,36	0,834	0,833	0,832	0,833
T4.16	0,3336	0,4093	0,4034	0,3821	0,6815	0,7039	1,3466	0,693	0,911	0,285	0,285	0,285	0,285
T4.17	0,0847	0,0846	0,0845	0,0846	0,8432	0,5876	0,2421	0,715	0,558	1,427	1,429	1,429	1,429
T4.18					1,8529	1,4879	0,9262	1,670	1,422				
T4.19	0,1141	0,1141	0,1172	0,1151	0,7326	0,5306	0,2123	0,632	0,492	1,066	1,066	1,066	1,066
T4.D1	0,0710	0,0851	0,0848	0,0803	0,6539	0,6482	0,6226	0,651	0,642	1,947	1,939	1,939	1,942
T4.D2	0,1103	0,1177	0,1264	0,1181	1,945	1,556	0,674	1,751	1,392	1,424	1,422	1,442	1,429
T4.D3	0,2378	0,2259	0,2378	0,2338	0	0,2497	0,0157	0,125	0,088	0,470	0,469	0,469	0,469
Average	0,1540	0,1687	0,1710	0,1646	0,794	0,7013	0,577	0,891	0,685	1,065	1,063	1,066	1,065

Tabela F.15 Dados dos testes do grupo 4 resultados para  $m_c, \alpha$  e  $k_c$  com injeção de partículas líquidas e sólidas.

Test	mc1	mc2	mc3	mc	a1	a2	a3	a1-2	a	kc1 (mD)	kc2 (mD)	kc3 (mD)	kc (mD)
T5.27					3,132	6,101	1,656	4,616	3,629				
T5.28					2,519	2,440	3,451	2,479	2,803				
T5.29					0,602	0,467	0,109	0,535	0,393				
T5.30					0,708	0,622	0,499	0,665	0,609				
T5.31	0,1025	0,1698	0,1914	0,1546	0,113	0,106	0,094	0,110	0,105	1,134	1,126	1,118	1,126
T5.32					0,737	0,702	0,620	0,719	0,686				
T5.33					0,902	0,897	0,881	0,899	0,893				
T5.34	0,0077	0,0126	0,0145	0,0116	0,113	0,109	0,094	0,111	0,105	6,552	6,544	6,513	6,536
T5.35	0,2724	0,2746	0,2761	0,2744	0,321	0,207	0,080	0,264	0,203	0,285	0,282	0,281	0,282
T5.36					4,015	3,012	1,646	3,513	2,891				
T5.37					5,457	5,168	4,039	5,312	4,888				
Average	0,1275	0,1523	0,1607	0,1468	1,692	1,803	1,197	1,748	1,564	2,657	2,651	2,637	2,648

Tabela F.16 Dados dos testes do grupo 5 resultados para  $m_c, \alpha$  e  $k_c$  com injeção de partículas líquidas e sólidas.

Test	K	O (l/h)	Cs	Ds	Co	Do	fc	r	R
T4.15	1059	4	55	7,0	300	5,0	26,9	0,042	15,0
T4.16	1258	4	60	4,0	280	3,0	26,9	0,023	7,9
T4.17	1301	4	24	7,0	280	6,0	26,9	0,044	13,3
T4.18	1170	4	22	5,0	250	4,0	26,9	0,031	8,4
T4.19	1309	4	24	7,0	280	6,0	26,9	0,044	13,2
T4.D1	1397	4	50	6,0	315	3,0	26,9	0,024	8,6
T4.D2	1666	4	50	4,0	280	5,0	26,9	0,031	10,2
T4.D3	997	10	60	10,0	300	48,0	26,9	0,342	123,2
Media	1270	4,8	43,1	6,3	286	10,0	26,9	0,073	25,0

Tabela F.17 Dados dos testes do grupo 4 resultados para  $k$ ,  $Q$ ,  $C_s$ ,  $D_s$ ,  $C_l$ ,  $D_l$  (decidir entre índice  $o$  ou  $l$ )  $\phi_{core}$ ,  $\rho$  e  $P$  com injeção de partículas líquidas e sólidas.

Test	K	Q (l/h)	Cs	Ds	Co	Do	fc	r	R
T5.27	454	3	5,0	6,0	300,0	6,0	18,0	0,060	18,22
T5.28	656	3	5,0	11,0	500,0	6,0	18,0	0,050	25,3
T5.29	1311,3	3	5	11	100	6	22	0,0404	4,242
T5.30	527	3	5,0	11,0	100,0	30,0	18,0	0,269	28,23
T5.31	2238,7	6	10	16	300	6	22	0,0313	9,715
T5.32	1237,3	3	10	6	300	6	22	0,04	12,4
T5.33	1640	3	10	6	300	51	22	0,2869	88,95
T5.34	977,33	3	10	16	300	6	22	0,0474	14,7
T5.35	1000	3	10	16	300	50	22	0,3627	112,4
T5.36	1148	3	10	16	300	6	22	0,0415	12,87
T5.37	1057,7	3	10,0	16	300	6	22	0,0433	13,41
Media	1113,4	3,3	8,2	11,9	281,8	16,3	20,9	0,116	31,0

Tabela F.18 Dados dos testes do grupo 5 resultados para  $k$ ,  $Q$ ,  $C_s$ ,  $D_s$ ,  $C_l$ ,  $D_l$   $\phi_{core}$ ,  $\rho$  e  $P$  com injeção de partículas líquidas e sólidas.

Test	m1	m2	m3	m	l (1/m)	l (1/m)	l (1/m)	l1-2 (1/m)	l (1/m)	b1	b2	b3	b1-2	b
T4.15	0,0024	0,0029	0,0030	0,0028	130,5	128,5	111	129,5	123,3	199,2	200,6	200,8	199,9	200,2
T4.16	0,0043	0,0057	0,0057	0,0052	106	110	211	108	142,3	357,9	352	352	354,95	353,97
T4.17	0,0012	0,0013	0,0015	0,0013	196	135	58	165,5	129,7	208	227,5	231	217,75	222,17
T4.18	0,0002	0,0004	0,0005	0,0004	68	53,5	33	60,75	51,5	68,5	81,9	93	75,2	81,133
T4.19	0,0013	0,0014	0,0016	0,0014	172,5	125	50	148,75	115,8	222	247	256	234,5	241,67
T4.D1	0,0013	0,0019	0,0019	0,0017	92,5	91,6	87,3	92,05	90,47	141,8	142,5	142,4	142,15	142,23
T4.D2	0,0007	0,0008	0,0009	0,0008	167	130	54	148,5	117	61,9	66,9	67,2	64,4	65,333
T4.D3	0,0005	0,0003	0,0005	0,0004	0	223	15		79,33			48,5		48,5
Average	0,0015	0,0018	0,0019	0,0018	117	125	77	122	106,2	179,9	188,3	173,86	184,12	169,4

Tabela F.19 Dados dos testes com partículas sólidas e misturas de partículas do grupo Quatro, parâmetros  $\lambda$   $\beta$  e  $m$ .

Test	mc1	mc2	mc3	mc	a1	a2	a3	a1-2	a	kc1 (mD)	kc2 (mD)	kc3 (mD)	kc (mD)
T4.15	0,1269	0,1444	0,1427	0,1380	0,225	0,222	0,192	0,223	0,213	0,152	0,151	0,151	0,151
T4.16	0,3336	0,4093	0,4034	0,3821	0,135	0,150	0,285	0,142	0,19	0,071	0,071	0,071	0,071
T4.17	0,0847	0,0846	0,0845	0,0846	0,067	0,045	0,019	0,056	0,044	0,132	0,132	0,132	0,132
T4.18					0,154	0,122	0,075	0,138	0,117				
T4.19	0,1141	0,1141	0,1172	0,1151	0,058	0,042	0,017	0,050	0,039	0,099	0,099	0,099	0,099
T4.D1	0,0710	0,0851	0,0848	0,0803	0,090	0,089	0,085	0,089	0,088	0,313	0,312	0,312	0,312
T4.D2	0,1103	0,1177	0,1264	0,1181	0,290	0,225	0,093	0,257	0,203	0,253	0,253	0,253	0,253
T4.D3	0,2378	0,2259	0,2378	0,2338	0,000	0,042	0,003	0,021	0,015	0,092	0,092	0,092	0,092
Average	0,1540	0,1687	0,1710	0,1646	0,12733	0,117	0,0962	0,108	0,114	0,159	0,159	0,158	0,159

Tabela F.20 Dados dos testes com partículas sólidas e misturas de partículas do grupo Quatro, parâmetros  $\alpha$   $k_c$  e  $m_c$ .

Test	m1	m2	m3	m	l1 (1/m)	l2 (1/m)	l3 (1/m)	l1-2 (1/m)	l (1/m)	b1	b2	b3	b1-2	b
T5.27	0,0000	0,0001	0,0001	0,0001	37,5	35,0	29,0	36,25	33,83	140	160	177	150	159
T5.28	0,0001	0,0002	0,0003	0,0002	38,5	37,2	35,3	37,85	37	436	459	477	447,5	457,33
T5.29	0,0001	0,0002	0,0002	0,0002	47,0	36,5	8,5	41,75	30,67	200	320	610	260	376,67
T5.30	0,0001	0,0002	0,0002	0,0002	30,5	26,5	21,6	28,5	26,2	275	320	345	297,5	313,33
T5.31	0,0024	0,0045	0,0054	0,0041	46,8	43,1	37,2	44,95	42,37	2455	2630	2725	2542,5	2603,3
T5.32	0,0001	0,0003	0,0005	0,0003	20,8	19,8	17,5	20,3	19,37	210	303	490	256,5	334,3
T5.33	0,0005	0,0008	0,0009	0,0007	24,2	23,1	21,8	23,685	23,05	123	275	388	199,0	262,0
T5.34	0,0009	0,0015	0,0021	0,0015	22,1	21,4	19,1	21,7	20,82	665	990	1650	827,5	1101,7
T5.35	0,0150	0,0170	0,0200	0,0173	184,0	119,0	47,0	151,5	116,7	7800	9200	10200	8500	9067
T5.36	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	100,0	75,0	41,0	87,5	72	48	60	76	54,0	61,3
T5.37	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	77,0	72,5	58,0	74,75	69,17	58	61	61	59,3	59,8
Average	0,0018	0,0023	0,0027	0,0	57,1	46,3	30,5	51,7	44,6	1128	1343	1564	1236	1345

Tabela F.21 Dados dos testes com partículas sólidas e misturas de partículas do grupo Cinco, parâmetros  $\lambda$ ,  $\beta$  e  $m$ .

Test	mc1	mc2	mc3	mc	a1	a2	a3	a1-2	a	kc1 (mD)	kc2 (mD)	kc3 (mD)	kc (mD)
T5.27					0,050	0,100	0,028	0,075	0,059				
T5.28					0,025	0,024	0,034	0,025	0,028				
T5.29					0,029	0,022	0,005	0,026	0,019				
T5.30					0,034	0,029	0,024	0,032	0,029				
T5.31	0,1025	0,1698	0,1914	0,1546	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003	0,043	0,043	0,043	0,043
T5.32					0,024	0,023	0,020	0,023	0,022				
T5.33					0,032	0,030	0,029	0,031	0,030				
T5.34	0,0077	0,0126	0,0145	0,0116	0,004	0,004	0,003	0,004	0,003	0,248	0,248	0,247	0,247
T5.35	0,2724	0,2746	0,2762	0,2744	0,010	0,007	0,003	0,008	0,007	0,011	0,011	0,011	0,011
T5.36					0,130	0,097	0,053	0,113	0,093				
T5.37					0,176	0,166	0,133	0,171	0,158				
Average	0,1275	0,1523	0,1607	0,1468	0,047	0,046	0,030	0,046	0,041	0,101	0,100	0,100	0,100

Tabela F.22 Dados dos testes com partículas sólidas e misturas de partículas do grupo Cinco, parâmetros  $\alpha$ ,  $k_c$  e  $m_c$ .

Test	k (mD)	T <sub>tr</sub> (PVI)	Rate (l/h)	PVI	c <sub>s</sub> <sup>0</sup>	r <sub>s</sub>	c <sub>1</sub> <sup>0</sup>	r <sub>1</sub>	f	r
T4.08	1099	481	4	580	50	3,5			26,9	0,055
T4.09	1482	455	4	633	50	3,5			26,9	0,047
T4.10	1615	470	4	775	60	2,5			26,9	0,032
T4.11	1018	830	4	1403	45	1,5			26,9	0,024
T4.12	1209		4	1160	24	2,0			26,9	0,030
T4.13	1598	332	4	270	24	3,5			26,9	0,045
T5.1	219	455	4	1200	5	5,5			18,0	0,158
T5.2	386	525	7	1200	5	5,5			18,0	0,119
T5.3	332	205	10	350	5	5,5			18,0	0,128
T5.4	467	337	4	500	5	8,0			18,0	0,157
T5.5	494	366	5	500	5	8,0			18,0	0,153
T5.6	349	658	10	650	5	8,0			18,0	0,182
T5.7	677	230	3	10	10	8,0			18,0	0,130
T5.8	1509		7	2000	3	5,5			22,0	0,066
T5.9	1114		5	2250	5	5,8			22,0	0,081
T5.10	1359		3	1333	10	8,0			22,0	0,102
T5.11	807	700	3	2000	10	3,0			22,0	0,050
T5.12	707		3	1500	3	3,0			22,0	0,053
T5.14	594		3	2500			100	3,0	18,0	0,052
T5.15	749		3	2850			300	3,0	18,0	0,047
T5.16	713		3	2000			500	3,0	18,0	0,048
T5.17	588		3	2000			100	9,0	18,0	0,157
T5.18	657		3	2000			100	13,0	18,0	0,215
T5.19	1498		3	1700			100	3,0	22,0	0,036
T5.21	1181		3	1500			300	25,5	22,0	0,348
T5.22	714		3	1700			100	3,0	22,0	0,053
T5.23	1293		3	1900			50	3,0	22,0	0,039
T5.24	835		3	3500			50	3,0	22,0	0,049
T5.25	984		3	1650			50	3,0	22,0	0,045
T4.15	1059	495	4	642	55	3,5	300	2,5	26,9	0,042
T4.16	1258	355	4	469	60	2,0	280	1,5	26,9	0,023
T4.17	1301	220	4	359	24	3,5	280	3,0	26,9	0,044
T4.18	1170		4	1355	22	2,5	250	2,0	26,9	0,031
T4.19	1309	220	4	347	24	3,5	280	3,0	26,9	0,044
T4.D1	1397	307	4	230	50	3,0	315	1,5	26,9	0,024
T4.D2	1666	545	4	370	50	2,0	280	2,5	26,9	0,031
T4.D3	997	49	10	45	60	5,0	300	24,0	26,9	0,342
T5.27	454		3	2500	5	3,0	300	3,0	18,0	0,060
T5.28	656		3	1700	5	5,5	500	3,0	18,0	0,050
T5.29	1311		3	1600	5	5,5	100	3,0	22,0	0,040
T5.30	527		3	2900	5	5,5	100	15,0	18,0	0,269
T5.31	2239	123	6	175	10	8,0	300	3,0	22,0	0,031
T5.32	1237		3	1500	10	3,0	300	3,0	22,0	0,040
T5.33	1640		3	1720	10	3,0	300	25,5	22,0	0,287
T5.34	977	250	3	700	10	8,0	300	3,0	22,0	0,047
T5.35	1000	87	3	150	10	8,0	300	25,0	22,0	0,363
T5.36	1148		3	1700	10	3,0	300	3,0	22,0	0,042
T5.37	1058		3	3000	10	3,0	300	3,0	22,0	0,043

Table 1. Three groups of tests for solid particles (T4.8-T4.13 and T.5.1-T5.12), oily water (T5.14-T5.25) and mixture filtration (T4.15-T4.19, T4.D1-T4.D3, T5.27-T5.37)

Tabela F.23 Tabela resumos de todos os teste.

## 17 Apêndice G. Teste de Correlações para os Parâmetros

Foram analisadas 5 possíveis correlações para os parâmetros medidos para os testes com partículas sólidas.

$$r = \frac{r_{\text{particula injetada}}}{\sqrt{k_{\text{core}} / f_{\text{core}}}}$$

$$DP_{\text{injetada}}$$

$$P = \left( \frac{r_{\text{particula injetada}}}{\sqrt{k_{\text{core}} / f_{\text{core}}}} \right)^c$$

$$\Sigma = r_{\text{particula injetada}}^c$$

$$\Omega = \sqrt{k_{\text{core}} / f_{\text{core}}}$$

Foram feitos gráficos com cada possibilidade de correlação para cada parâmetro



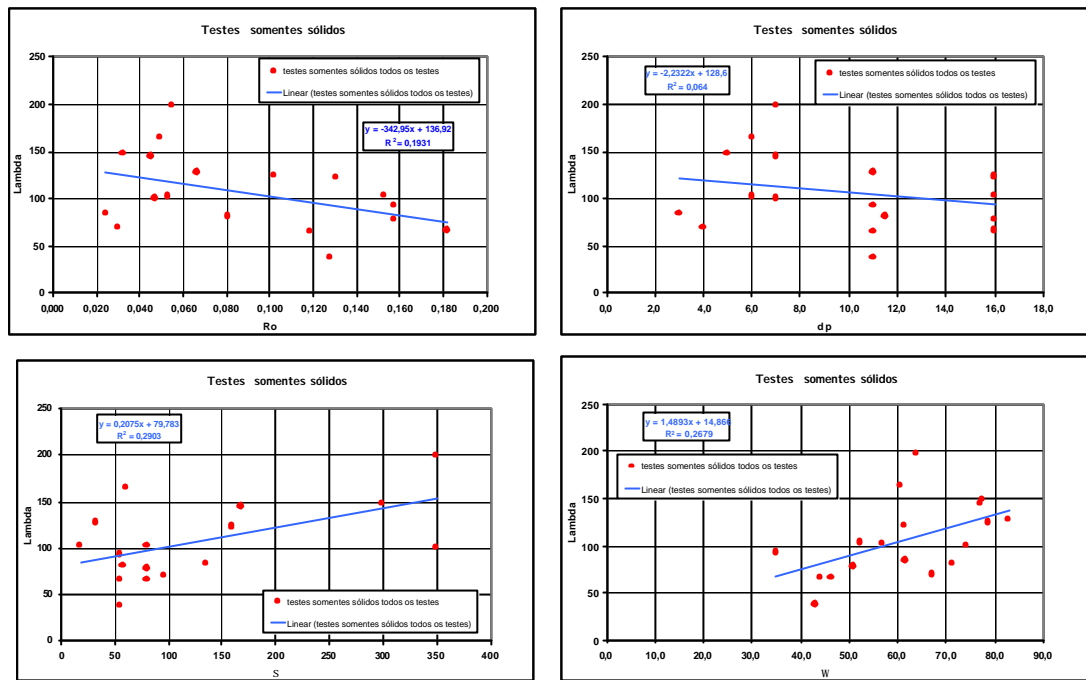


Gráfico G.1; Correlações para  $\lambda$  contra  $\rho$ ,  $d_p$ ,  $\Sigma$  e  $\Omega$ , todos os testes com injeção de partículas sólidas.

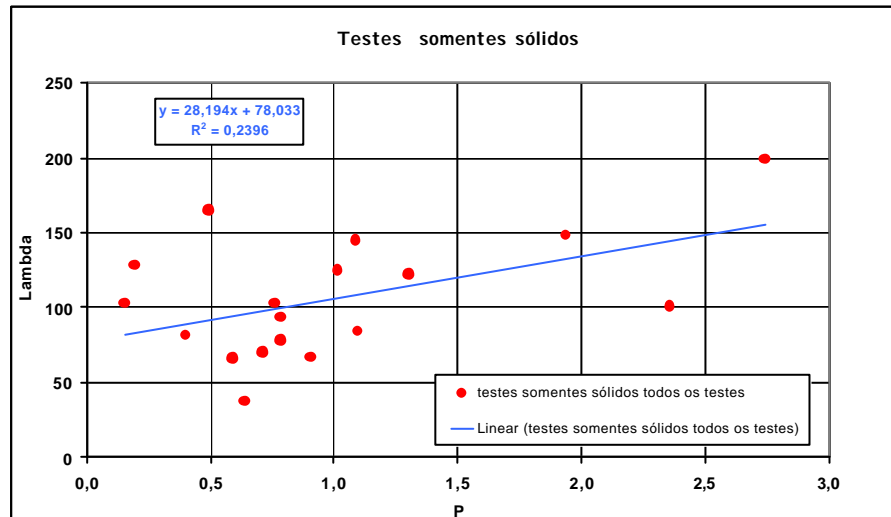


Gráfico G.2; Correlação para  $\lambda$  contra  $P$ , todos os testes com injeção de partículas sólidas.

Pode-se observar que a correlação mais pobre é a contra  $\rho$ , todas as outras são um pouco melhores, mas com pequenas diferenças em si, foi escolhida a correlação com  $P$  apenas porque a mesma inclui todos os fatores que poderiam influir em  $\lambda$ .

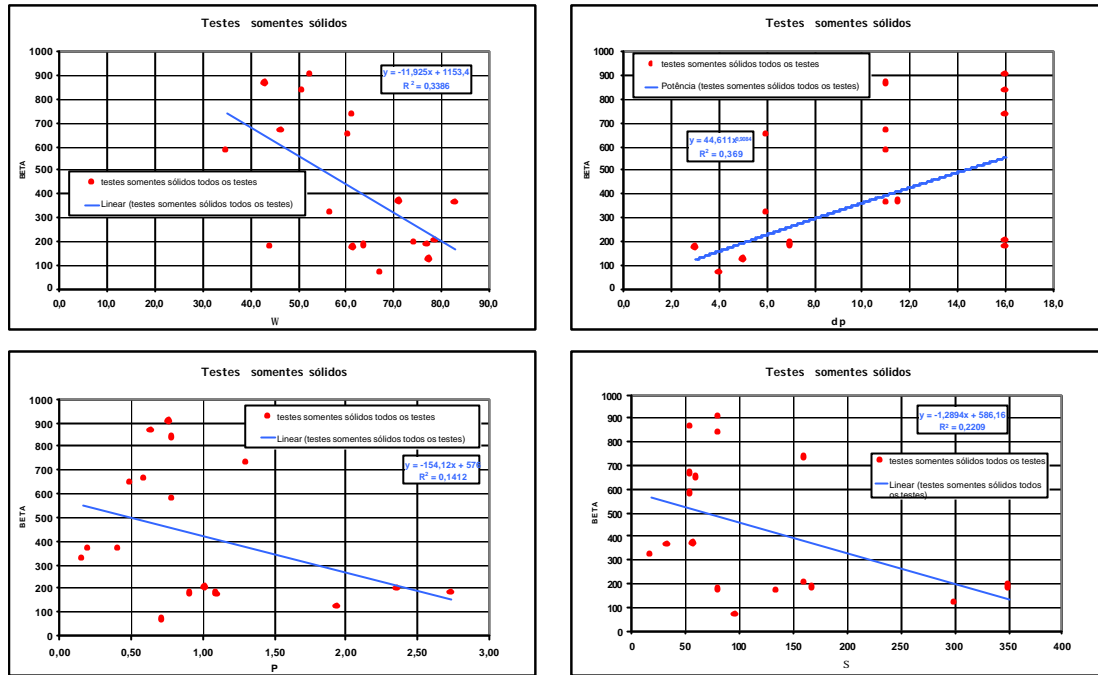


Gráfico G.3; Correlação para  $\beta$  contra  $\Omega$ ,  $d_p$ , P e  $\Sigma$ , todos os testes com injeção de partículas sólidas.

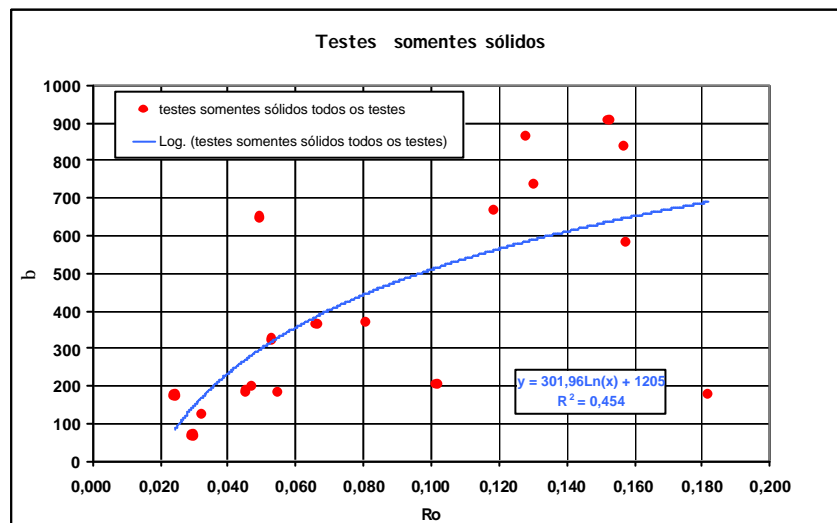


Gráfico G.4; Correlação para  $\beta$  contra  $\rho$ , todos os testes com injeção de partículas sólidas.

No caso de  $\beta$  a correlação que melhor se ajusta foi a contra  $\rho$ .

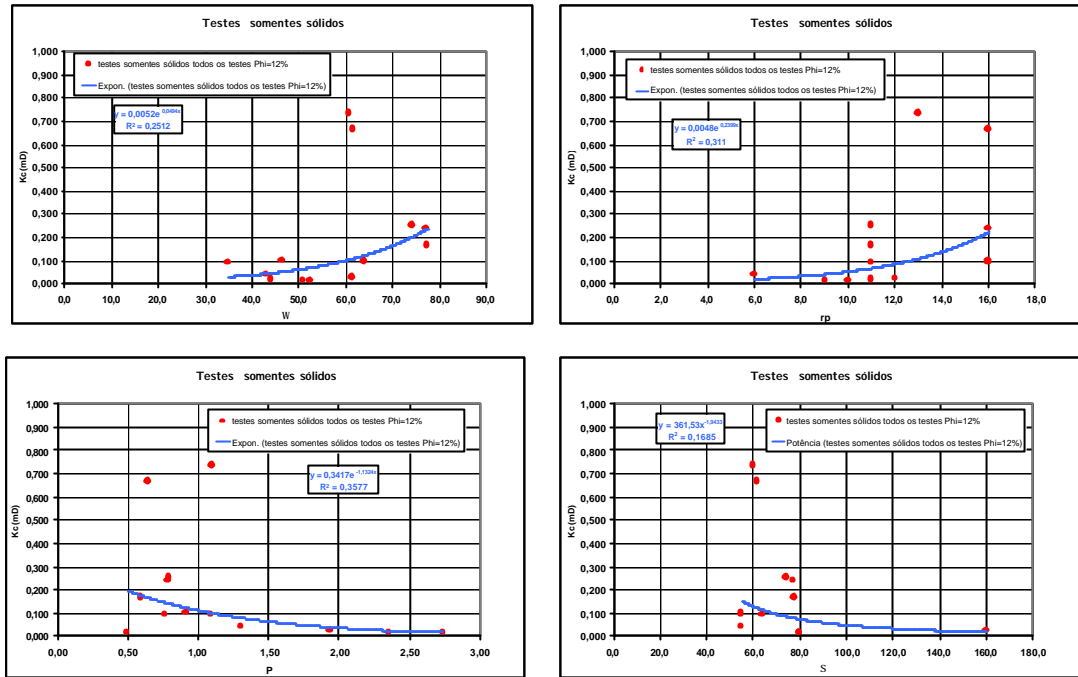


Gráfico G.5; Correlação para  $k_c$  contra  $\Omega$ ,  $dp$ ,  $P$  e  $\Sigma$ , todos os testes com injeção de partículas sólidas.

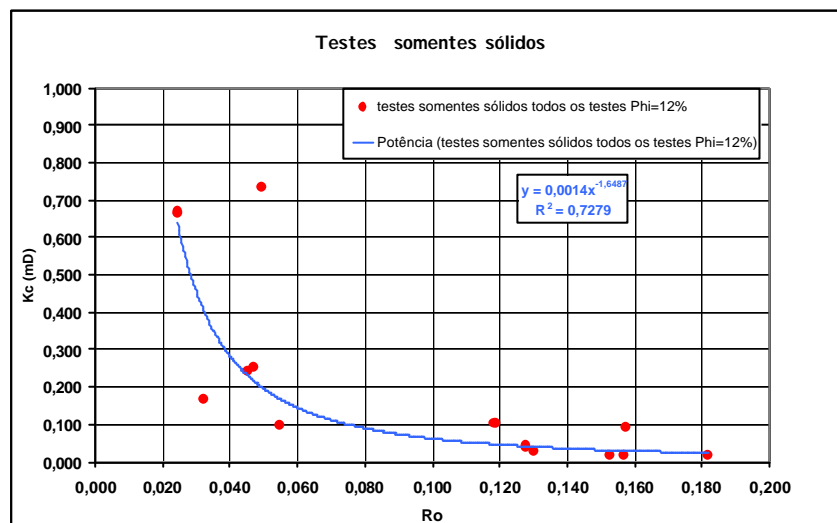


Gráfico G.6; Correlação para  $k_c$  contra  $\rho$ , todos os testes com injeção de partículas sólidas.

Assim como para  $\beta$  a melhor correlação é com  $\rho$ , no caso de  $k_c$  a diferença é ainda maior.

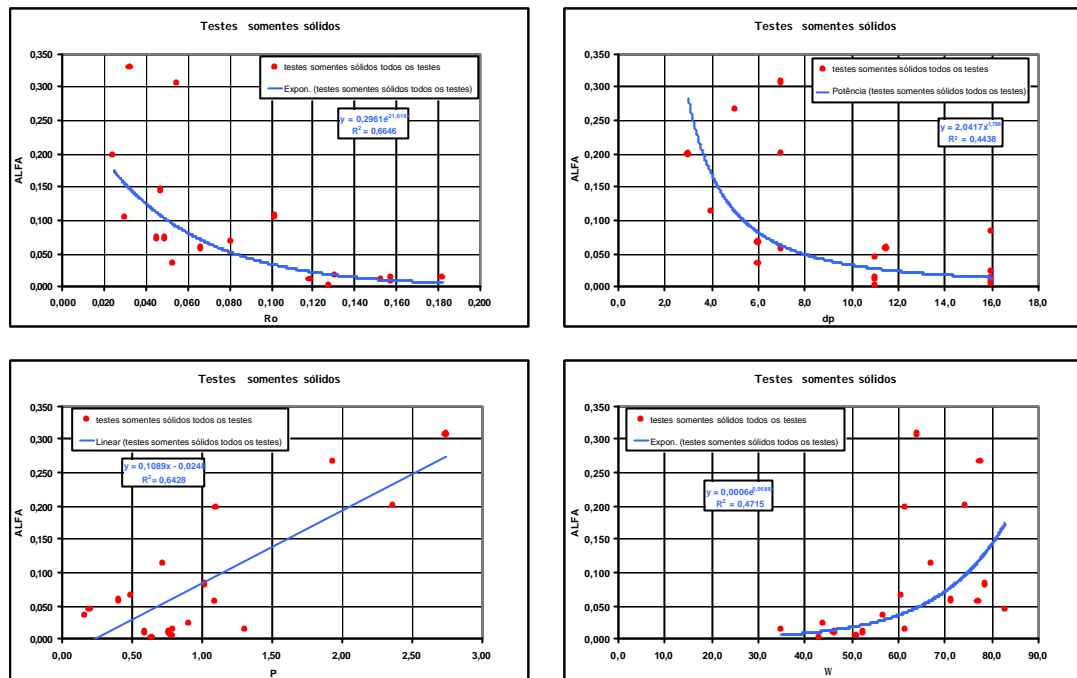


Gráfico G.7; Correlação para  $\alpha$  contra  $\rho$ ,  $d_p$ ,  $P$  e  $\Omega$ , todos os testes com injeção de partículas sólidas.

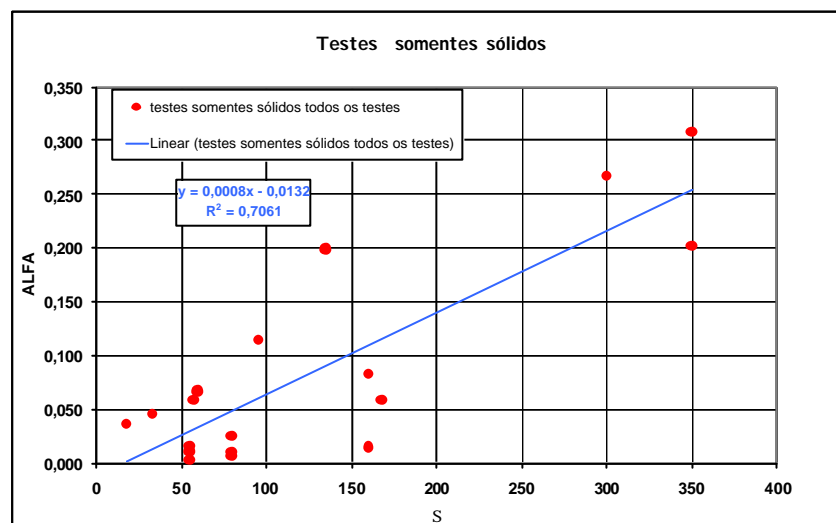


Gráfico G.8: Correlação para  $\alpha$  contra  $\Sigma$ , todos os testes com injeção de partículas sólidas.

No caso de  $\alpha$  a melhor correlação seria com  $\Sigma$ , a correlação com  $\rho$  entretanto é bastante próxima.

Como a correlação de  $\rho$  com  $\beta$ ,  $k_c$  e  $\alpha$  é a melhor ou muito próxima da melhor e para limitar o número de gráficos neste trabalho serão mostrados apenas os gráficos correspondentes a essa correlação no corpo principal da tese e apenas para  $\lambda$  seriam apresentados também os gráficos para a variável  $P$ .