

Este exemplar corresponde a redação final  
da tese defendida por NEWMAN DE  
SOUZA e aprovada  
pela comissão julgadora em 10/12/1991.

César Costapinto Santana  
ORIENTADOR

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

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

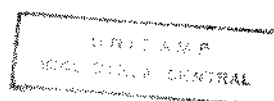
**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA FILTRAÇÃO  
DE FLUIDOS DE FRATURAMENTO HIDRÁULICO**

Autor: Newman de Souza

Orientador : César Costapinto Santana ok

62/91

dezembro - 1991



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

A dissertação "Avaliação Experimental da Filtração de Fluidos de Fraturamento Hidráulico", elaborada por Newman de Souza e aprovada por todos os membros da Banca Examinadora, foi aceita pela Sub-Comissão de Pós-Graduação em Engenharia de Petróleo como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Petróleo.

Campinas, 10 de dezembro de 1991

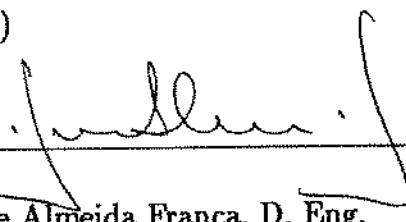
Banca Examinadora



---


César Costapinto Santana, D. Sc.

(Orientador)



---

Fernando de Almeida França, D. Eng.



---

Alcir de Faro Orlando, Ph. D.

À minha esposa

Aurea

e

ao meu filho

Felipe.

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. César Costapinto Santana pela orientação e estímulo.

Ao Prof. Dr. Alcir de Faro Orlando pelas sugestões e esclarecimentos prestados.

Ao Prof. Dr. Fernando de Almeida França por ter aceito participar da banca examinadora.

Ao Prof. João B. de Campos pelo apoio e incentivo.

À Lenita Rangel de Souza pelo carinho e dedicação demonstrados na realização dos ensaios de laboratório.

Aos colegas do CENPES-DIPLLOT e especialmente àqueles do SECRES que contribuíram decisivamente na elaboração deste trabalho.

À Aurea pelo apoio irrestrito em todos os momentos e pela compreensão.

Aos meus pais pela educação e boa formação que recebi.

Ao amigos que participaram do curso de mestrado, pela convivência saudável e pela amizade demonstrada, sem as quais teria sido mais difícil.

À Petróleo Brasileiro S.A. - PETROBRÁS - pela oportunidade e pelo suporte financeiro para realização deste trabalho.

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	Importância do estudo da filtração de soluções poliméricas viscosas nas operações de fraturamento hidráulico . . . . .	2
1.2	Filtração estática e dinâmica . . . . .	3
1.3	Fluidos de fraturamento . . . . .	5
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>8</b>
2.1	Evolução da filtração aplicada a fratura . . . . .	8
2.2	Filtração dinâmica em laboratório . . . . .	9
2.3	Modelos . . . . .	12
2.3.1	D. K. Poulsen, Halliburton Services . . . . .	12
2.3.2	W. L. Medlin, Mobil ReD Corp., L. Massé . . . . .	15
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>18</b>
3.1	A prática corrente e o Simulador . . . . .	18
3.2	Preparo dos Plugues para Ensaio de Filtração . . . . .	18
3.3	Preparo do Fluido para Ensaio de Filtração . . . . .	19
3.4	A Célula de Filtração . . . . .	20
3.5	O Simulador Físico de Dano . . . . .	20
3.6	O Ensaio de Filtração . . . . .	24
<b>4</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b>	<b>27</b>
4.1	A curva de filtração Volume x Tempo . . . . .	27

4.1.1	Fluido Viscoso não Reticulado . . . . .	27
4.1.2	Fluido Viscoso Reticulado . . . . .	36
4.2	Análise dos ensaios de filtração conforme o modelo proposto por McCabe . . . . .	45
4.3	Análise dos ensaios de filtração conforme o modelo proposto por Poulsen . . . . .	51
4.3.1	Fluido Viscoso não Reticulado . . . . .	53
4.3.2	Fluido Viscoso Reticulado . . . . .	62
4.4	Análise dos ensaios de filtração conforme o modelo proposto por Medlin . . . . .	70
<b>5</b>	<b>Conclusões e Recomendações</b>	<b>78</b>
5.1	Conclusões . . . . .	78
5.2	Recomendações . . . . .	79
<b>A</b>	<b>TABELAS DE DADOS DE FILTRAÇÃO</b>	<b>91</b>
<b>B</b>	<b>TEORIA SIMPLIFICADA DA FILTRAÇÃO</b>	<b>99</b>
B.1	Lei de Darcy . . . . .	99
B.2	Equação Kozeny . . . . .	100
B.3	Filtração com formação de reboco . . . . .	102
B.3.1	Resistência média específica do reboco . . . . .	103
B.3.2	Resistência do meio filtrante . . . . .	107
B.3.3	Equação de trabalho . . . . .	107
B.3.4	Filtração a pressão constante . . . . .	108
<b>C</b>	<b>COEFICIENTE DO FLUIDO DE FRATURAMENTO</b>	<b>109</b>
C.1	Modelo de Carter para filtração em uma fratura . . . . .	109

C.2	Modelo de Howard e Fast . . . . .	111
C.2.1	Coeficiente de fluido de fraturamento viscoso . . . . .	112
C.2.2	Coeficiente do fluido do reservatório . . . . .	113
C.2.3	Coeficiente de fluido de fraturamento formador de reboco . . . . .	114
C.3	Coeficiente composto de Williams . . . . .	114
<b>D</b>	<b>INCERTEZA NOS PARÂMETROS DE FILTRAÇÃO</b>	<b>116</b>
D.1	Modelo de Poulsen . . . . .	116

## Lista de Tabelas

1	Ensaio de Filtração - Fluido Linear HPG 3,6 $kg/m^3$ . . . . .	25
2	Ensaio de filtração - Fluido Reticulado HPG 3,6 $kg/m^3$ . . . . .	26
3	Análise de McCabe - Fluido Linear . . . . .	46
4	Análise de Poulsen - Fluido Linear . . . . .	53
5	Análise de Poulsen aplicada ao trecho final do ensaio - Fluido Linear . . . . .	56
6	Análise de Poulsen - Fluido Reticulado . . . . .	63
7	Análise de Medlin - Fluido Reticulado . . . . .	71
A.1	TV0708 - Filtrado acumulado x Tempo . . . . .	91
A.2	TV0808 - Filtrado acumulado x Tempo . . . . .	91
A.3	TV0908A - Filtrado acumulado x Tempo . . . . .	92
A.4	TV0908B - Filtrado acumulado x Tempo . . . . .	92
A.5	TV0908C - Filtrado acumulado x Tempo . . . . .	93
A.6	TV1008A - Filtrado acumulado x Tempo . . . . .	93
A.7	TV1008B - Filtrado acumulado x Tempo . . . . .	94
A.8	TV1208 - Filtrado acumulado x Tempo . . . . .	94
A.9	TV1308B - Filtrado acumulado x Tempo . . . . .	95
A.10	TV1408 - Filtrado acumulado x Tempo . . . . .	95
A.11	TV1508A - Filtrado acumulado x Tempo . . . . .	96
A.12	TV1508B - Filtrado acumulado x Tempo . . . . .	96
A.13	TV1608 - Filtrado acumulado x Tempo . . . . .	97
A.14	TV1808A - Filtrado acumulado x Tempo . . . . .	97



A.15 TV1808B - Filtrado acumulado x Tempo . . . . .	98
A.16 TV1808C - Filtrado acumulado x Tempo . . . . .	98
D.1 Incerteza no cálculo de $\alpha_w$ . . . . .	117
D.2 Incerteza no cálculo de $R_v$ . . . . .	118

## Lista de Figuras

1	Representação esquemática de um fraturamento hidráulico . . . . .	2
2	Célula Baroid modificada utilizada em ensaios de filtração estática . . . . .	4
3	Células de filtração dinâmica com escoamento plano, anular e axial . . . . .	5
4	Faixa limite de temperatura para diversos íons metálicos reticuladores . . . . .	6
5	Célula de escoamento radial utilizada no trabalho de Hall e Dollarhide . . . . .	10
6	Representação da filtração na fratura conforme o modelo de Poulsen . . . . .	14
7	Invasão de sólidos no meio poroso . . . . .	16
8	Representação da célula de filtração . . . . .	21
9	Fluxograma simplificado do Simulador Físico de Dano . . . . .	23
10	Filtrado acumulado x Tempo (HPG 3,6 $kg/m^3$ ) . . . . .	28
11	Filtrado acumulado x Tempo (HPG 3,6 $kg/m^3$ ) . . . . .	28
12	Filtrado acumulado x Tempo (HPG 3,6 $kg/m^3$ ) . . . . .	29
13	Filtrado acumulado x Tempo (HPG 3,6 $kg/m^3$ ) . . . . .	29
14	Filtrado acumulado x Tempo (HPG 3,6 $kg/m^3$ ) . . . . .	30
15	Filtrado acumulado x Tempo (HPG 3,6 $kg/m^3$ ) . . . . .	30
16	Filtrado acumulado x Tempo (HPG 3,6 $kg/m^3$ ) . . . . .	31
17	Filtrado acumulado x Tempo (HPG 3,6 $kg/m^3$ ) . . . . .	31
18	Efeito da pressão (HPG 3,6 $kg/m^3$ ) . . . . .	33
19	Efeito da vazão de circulação (HPG 3,6 $kg/m^3$ ) . . . . .	34
20	Efeito da temperatura do fluido (HPG 3,6 $kg/m^3$ ) . . . . .	34
21	Efeito da permeabilidade do plugue (HPG 3,6 $kg/m^3$ ) . . . . .	35

22	Filtrado acumulado x Tempo (HPG reticulado 3,6 $kg/m^3$ ) . . . . .	36
23	Filtrado acumulado x Tempo (HPG reticulado 3,6 $kg/m^3$ ) . . . . .	37
24	Filtrado acumulado x Tempo (HPG reticulado 3,6 $kg/m^3$ ) . . . . .	37
25	Filtrado acumulado x Tempo (HPG reticulado 3,6 $kg/m^3$ ) . . . . .	38
26	Filtrado acumulado x Tempo (HPG reticulado 3,6 $kg/m^3$ ) . . . . .	38
27	Filtrado acumulado x Tempo (HPG reticulado 3,6 $kg/m^3$ ) . . . . .	39
28	Filtrado acumulado x Tempo (HPG reticulado 3,6 $kg/m^3$ ) . . . . .	39
29	Filtrado acumulado x Tempo (HPG reticulado 3,6 $kg/m^3$ ) . . . . .	40
30	Efeito da pressão (HPG reticulado 3,6 $kg/m^3$ ) . . . . .	41
31	Efeito da temperatura do fluido (HPG reticulado 3,6 $kg/m^3$ ) . . . . .	42
32	Efeito da vazão de circulação (HPG reticulado 3,6 $kg/m^3$ ) . . . . .	42
33	Efeito da permeabilidade do plugue (HPG reticulado 3,6 $kg/m^3$ ) . . . . .	44
34	Ajuste dos dados experimentais conforme McCabe (HPG 3,6 $kg/m^3$ ) . . .	46
35	Ajuste dos dados experimentais conforme McCabe (HPG 3,6 $kg/m^3$ ) . . .	47
36	Ajuste dos dados experimentais conforme McCabe (HPG 3,6 $kg/m^3$ ) . . .	47
37	Ajuste dos dados experimentais conforme McCabe (HPG 3,6 $kg/m^3$ ) . . .	48
38	Ajuste dos dados experimentais conforme McCabe (HPG 3,6 $kg/m^3$ ) . . .	48
39	Ajuste dos dados experimentais conforme McCabe (HPG 3,6 $kg/m^3$ ) . . .	49
40	Ajuste dos dados experimentais conforme McCabe (HPG 3,6 $kg/m^3$ ) . . .	49
41	Pressão x Resistência do reboco . . . . .	50
42	Vazão de circulação x $\alpha_w$ . . . . .	54
43	Ajuste dos dados experimentais conforme Poulsen (HPG 3,6 $kg/m^3$ ) . . . .	57

44	Ajuste dos dados experimentais conforme Poulsen (HPG 3,6 $kg/m^3$ ) . . . .	58
45	Ajuste dos dados experimentais conforme Poulsen (HPG 3,6 $kg/m^3$ ) . . . .	58
46	Ajuste dos dados experimentais conforme Poulsen (HPG 3,6 $kg/m^3$ ) . . . .	59
47	Ajuste dos dados experimentais conforme Poulsen (HPG 3,6 $kg/m^3$ ) . . . .	59
48	Ajuste dos dados experimentais conforme Poulsen (HPG 3,6 $kg/m^3$ ) . . . .	60
49	Ajuste dos dados experimentais conforme Poulsen (HPG 3,6 $kg/m^3$ ) . . . .	60
50	Ajuste dos dados experimentais conforme Poulsen (HPG 3,6 $kg/m^3$ ) . . . .	61
51	Vazão de circulação x $\alpha_w$ . . . . .	64
52	Ajuste dos dados experimentais conforme Poulsen (HPG reticulado) . . . .	64
53	Ajuste dos dados experimentais conforme Poulsen (HPG reticulado) . . . .	65
54	Ajuste dos dados experimentais conforme Poulsen (HPG reticulado) . . . .	65
55	Ajuste dos dados experimentais conforme Poulsen (HPG reticulado) . . . .	66
56	Ajuste dos dados experimentais conforme Poulsen (HPG reticulado) . . . .	66
57	Ajuste dos dados experimentais conforme Poulsen (HPG reticulado) . . . .	67
58	Ajuste dos dados experimentais conforme Poulsen (HPG reticulado) . . . .	67
59	Ajuste dos dados experimentais conforme Poulsen (HPG reticulado) . . . .	68
60	Curva de filtração teórica apresentada por Poulsen . . . . .	69
61	Ajuste dos dados experimentais conforme Medlin (HPG reticulado) . . . .	73
62	Ajuste dos dados experimentais conforme Medlin (HPG reticulado) . . . .	73
63	Ajuste dos dados experimentais conforme Medlin (HPG reticulado) . . . .	74
64	Ajuste dos dados experimentais conforme Medlin (HPG reticulado) . . . .	74
65	Ajuste dos dados experimentais conforme Medlin (HPG reticulado) . . . .	75

66	Ajuste dos dados experimentais conforme Medlin (HPG reticulado) . . . . .	75
67	Ajuste dos dados experimentais conforme Medlin (HPG reticulado) . . . . .	76
68	Curva de filtração teórica apresentada por Medlin . . . . .	77
B.1	Analogia com o escoamento em tubos . . . . .	101
B.2	Filtração com formação de reboco . . . . .	103
B.3	Representação esquemática da filtração com formação de reboco . . . . .	104
B.4	Efeito das forças viscosas na porosidade do reboco . . . . .	106
C.1	Modelo de fratura proposto por Carter . . . . .	109
C.2	Resistências ao escoamento do filtrado para a formação . . . . .	112

## RESUMO

A operação de fraturamento hidráulico é um importante instrumento na busca do aumento da produção e das reservas de petróleo em todo o mundo. A produção de jazidas pode ser viabilizada comercialmente através da aplicação desta técnica, mesmo para situações inicialmente consideradas desfavoráveis.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma avaliação experimental do comportamento da filtração de um fluido empregado regularmente em operações de fraturamento hidráulico.

Os ensaios de filtração mais usuais são do tipo estático. Estes testes apresentam a desvantagem de não representar adequadamente o escoamento em uma fratura. Neste trabalho, um equipamento desenvolvido pelo Centro de Pesquisa da Petrobras (Cenpes) para o estudo da invasão de fluidos nas rochas reservatório, pôde ser empregado para avaliar a filtração de um fluido de fraturamento, com a vantagem de permitir tanto a realização de testes dinâmicos como estáticos. Buscou-se ainda, repetir as mesmas condições normalmente verificadas durante uma operação comercial. O fluido utilizado foi uma solução aquosa de HPG na concentração de  $3,6 \text{ kg/m}^3$  (30 lb/1000 gal), nas formas reticulada e linear.

Dois modelos baseados na teoria simplificada da filtração, foram utilizados para fazer a interpretação dos resultados dos ensaios. Um dos modelos representa melhor a filtração de fluido linear enquanto o outro se ajustou mais ao fluido reticulado.

Os resultados obtidos confirmam a maior eficiência do fluido reticulado na contenção da perda de fluido para a formação notadamente quando a permeabilidade da rocha é mais elevada. Destaca-se ainda que a eficiência tanto para o fluido linear como para o reticulado é menor em condição dinâmica do que em condição estática.

## ABSTRACT

Hydraulic Fracturing is an important instrument in increasing the production and reserves of oil in the world. A subcommercial accumulation could be changed to profitable one by means of hydraulic fracturing.

This work intends to present an empirical evaluation of filtration behavior of a fracturing fluid regularly employed in hydraulic fracturing jobs.

Static tests are very common in defining the filtration properties of a fracturing fluid. However, poor representation of actual flow conditions in the fracture is a handicap to a test of this kind. To avoid this limitation, dynamic and static filtration tests being part of the scope of this work were developed in a special equipment, designed in Petrobras Research Center (Cenpes) to perform tests of fluid invasion in reservoir rocks. A  $3.6 \text{ kg/m}^3$  (30 lb/1000 gal) solution of HPG polymer in water was used, both in crosslinked and linear form.

Test result analysis was based in two models describing the classical theory of filtration. Better representation of linear fluid tests was accomplished by one of the models while the other has fitted very well to crosslinked fluid tests.

As expected, efficiency of fracturing fluid is reduced in dynamic filtration conditions. Besides that, high permeability formations cause minor effects in filtration of crosslinked fluids.

# 1 INTRODUÇÃO

O escoamento de fluidos através de meios porosos é muito frequente. Nas estações de tratamento de água é bastante comum a filtração da água através de leitos fixos de areia.

O primeiro trabalho experimental tratando deste assunto foi conduzido por DARCY em 1830 em Dijon, quando ele examinou o escoamento de água de fontes locais através de leitos de areia de variadas espessuras.

Na área de prospecção de petróleo a filtração se torna importante durante a fase de perfuração, quando a lama de perfuração entra em contato com as camadas permoporosas atravessadas pelo poço. Neste caso há a formação de reboco que reduz a perda de fluido para a formação e estabiliza as paredes do poço.

Durante a vida produtiva do poço são realizadas diversas operações onde a filtração desempenha um importante papel. Podemos destacar a compressão de cimento (squeeze), o amortecimento de poços e o fraturamento hidráulico.

O conhecimento dos mecanismos que regem a filtração de fluidos de fraturamento tem sido adquirido através de pesquisas em vários laboratórios no exterior [5][6][8][11][15][30], e também no CENPES [31].

Este trabalho de tese se inclui no programa de atuação do Laboratório de Prevenção de Dano à Formação do CENPES responsável pela implantação de um simulador físico de dano à formação em escala piloto, e desenvolvimento, em cooperação com a empresa Engecor, de tecnologia específica para a fabricação de corpos - de - prova (plugues) sintéticos com propriedades petrofísicas bem definidas.

Tem como objetivo averiguar experimentalmente o comportamento da filtração de uma solução polimérica aquosa, através de um sistema que simula as condições que



prevalecem durante uma operação regular de fraturamento hidráulico.

Este sistema é composto por um simulador físico de dano à formação , que permite a realização de testes dinâmicos de filtração em plugues sintéticos, livres das interferências normalmente associadas aos plugues naturais.

### 1.1 Importância do estudo da filtração de soluções poliméricas viscosas nas operações de fraturamento hidráulico

As operações de fraturamento (fig. 1) consistem em bombear para o poço um fluido apropriado (geralmente uma solução polimérica) de modo que a zona de interesse seja submetida a um diferencial de pressão suficiente para provocar a ruptura da rocha. Com o prosseguimento do bombeio cria-se uma fratura que se estende desde o poço para o interior da formação .

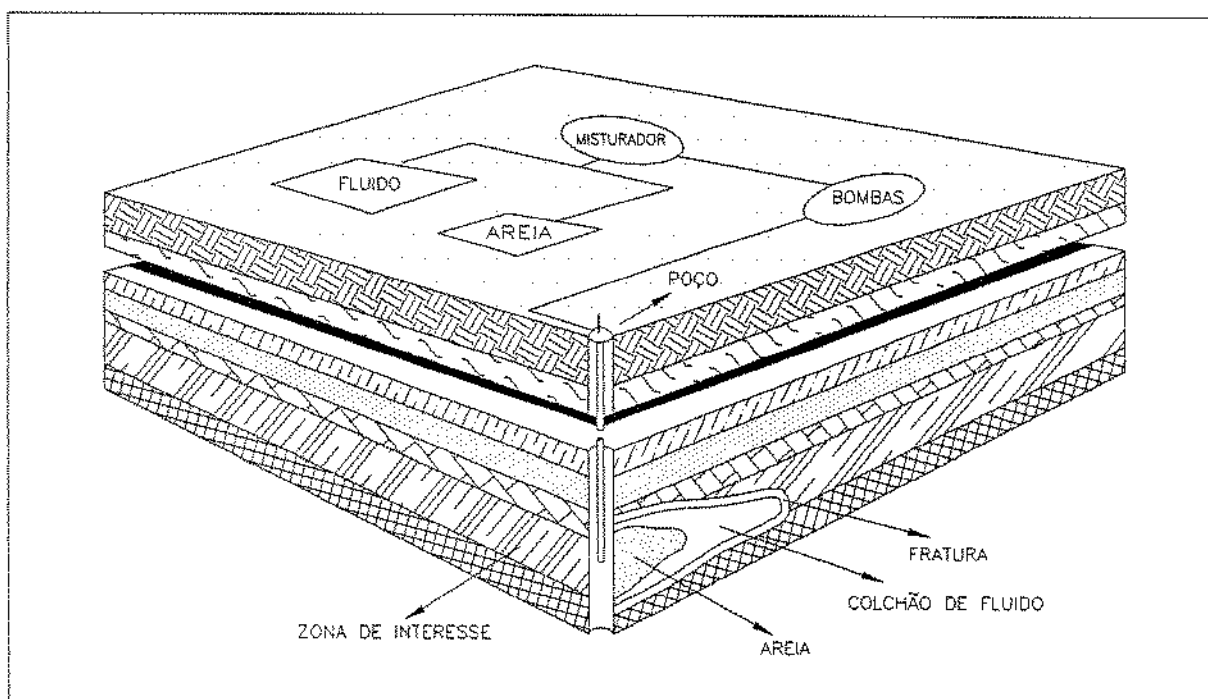


Figura 1: Representação esquemática de um fraturamento hidráulico

A diferença de pressão criada entre o fluido no interior da fratura e o fluido que satura a rocha permeável, faz com que parte do fluido bombeado atravesse as faces da fratura, deixando de contribuir para o seu crescimento.

Podemos perceber então que o espaço criado por esta fratura é inversamente proporcional à taxa de filtração do fluido através das paredes da fratura.

O fluido bombeado contém uma elevada concentração de sólidos, geralmente areia selecionada. Ao término da operação, quando deixa de existir a diferença de pressão que deu origem à fratura, são estes sólidos que devem suportar as paredes da fratura, mantendo aberto um canal de alta permeabilidade por onde o fluido da formação deverá escoar.

Os altos custos envolvidos em uma operação deste tipo, e os reflexos na vida produtiva do poço, têm levado a um constante aperfeiçoamento dos métodos e das técnicas em vigor. Desta forma foram feitos avanços na área de fluido, equipamentos e de modelagem teórica.

A utilização dos simuladores de fraturamento hidráulico pressupõe o conhecimento das variáveis envolvidas no processo. Uma das principais é a taxa de filtração através da parede da fratura.

A filtração de soluções poliméricas através de um meio poroso incompressível é um problema que ainda não pode ser resolvido de uma forma completamente analítica. Assim, a obtenção das curvas de filtração dependem da realização de ensaios de laboratório. Para que os resultados sejam mais representativos, devem ser obtidos nas mesmas condições de escoamento da fratura.

## 1.2 Filtração estática e dinâmica

A filtração como ocorre em uma fratura hidráulica deve ser simulada em laboratório para que sejam obtidos os parâmetros necessários ao projeto de fraturamento.

Os testes mais usuais são feitos com um filtro prensa HTHP (fig. 2) onde o meio filtrante pode ser o papel ou um pequeno plugue retirado da rocha a ser fraturada [25]. Em ambos os casos o ensaio de filtração é feito em condições estáticas, isto é, a velocidade do fluido no interior da célula de filtração é normal à face do meio filtrante. O principal parâmetro obtido destes testes é a resistência ao escoamento criada pelo reboco formado na face do filtro.

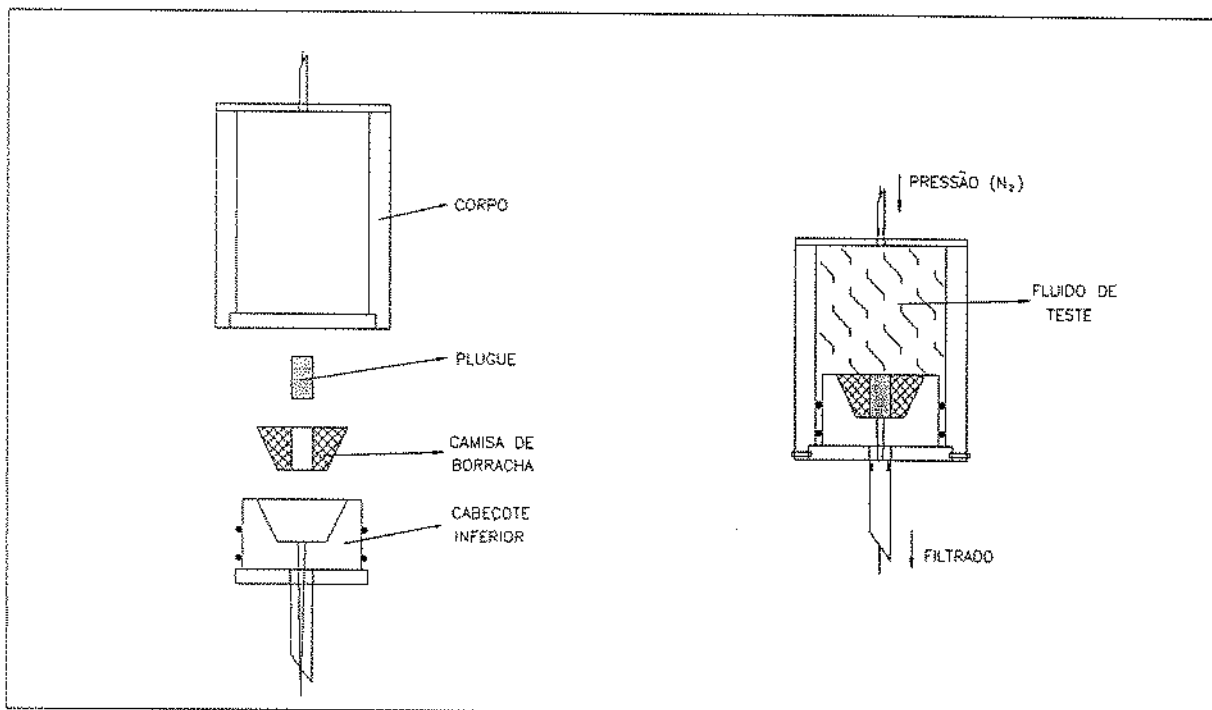


Figura 2: Célula Baroid modificada utilizada em ensaios de filtração estática

A partir do trabalho de Hall e Dollarhide [2][3], têm sido realizados vários ensaios de filtração dinâmica (fig. 3) que representam melhor o que ocorre em uma fratura hidráulica. Nestes casos, o escoamento, paralelo à face do meio filtrante, produz um atrito com o reboco em formação, que altera suas propriedades mecânicas e a sua resistência à percolação do filtrado, em comparação com os ensaios estáticos.

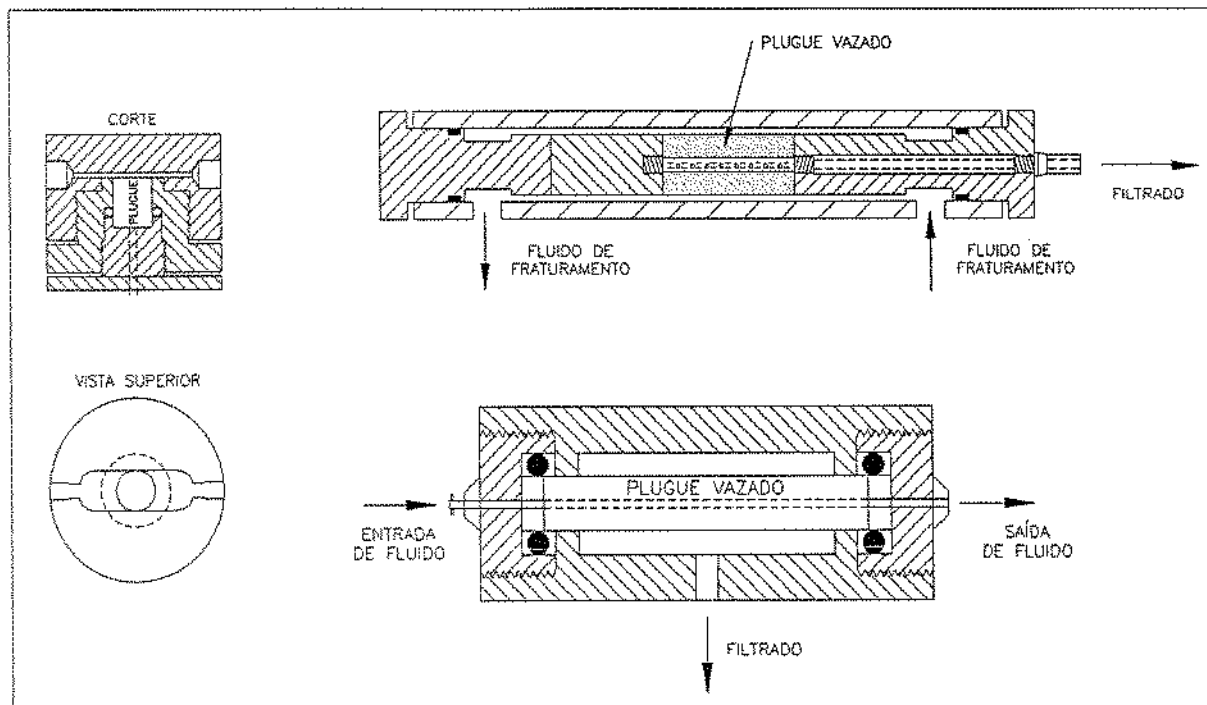


Figura 3: Células de filtração dinâmica com escoamento plano, anular e axial

### 1.3 Fluidos de fraturamento

Há muitos tipos de fluidos disponíveis para um fraturamento hidráulico [16]. Cada operação requer uma análise especial para que o fluido escolhido cumpra as diversas funções a ele reservadas.

Os fluidos base água são os mais utilizados por reunirem propriedades adequadas a um baixo custo.

Um fluido de fraturamento deve possuir viscosidade suficiente para evitar a decantação do agente de sustentação, provocar uma reduzida perda de carga durante o bombeio, permitir uma taxa de filtração baixa, não ser nocivo à formação e ser de fácil recuperação [1].

Para que a filtração seja controlada o fluido escolhido deve ter a capacidade de formar reboco e ser viscoso. As soluções poliméricas em água atendem a estes dois

requisitos. As longas cadeias formadas pela hidratação do polímero garantem ao fluido uma elevada viscosidade e a capacidade de formar um reboco na face do filtro.

Estas características podem ser melhoradas através de aditivos. Uma das maneiras de se elevar a viscosidade do fluido, é através da reticulação obtida com a adição de um íon metálico na solução .

A reticulação do polímero faz com que as cadeias se liguem para formar um sistema tridimensional que apresenta alta viscosidade e alta capacidade de sustentação de sólidos. Este sistema é estável até uma determinada temperatura que está associada ao íon utilizado para fazer a reticulação (fig. 4).

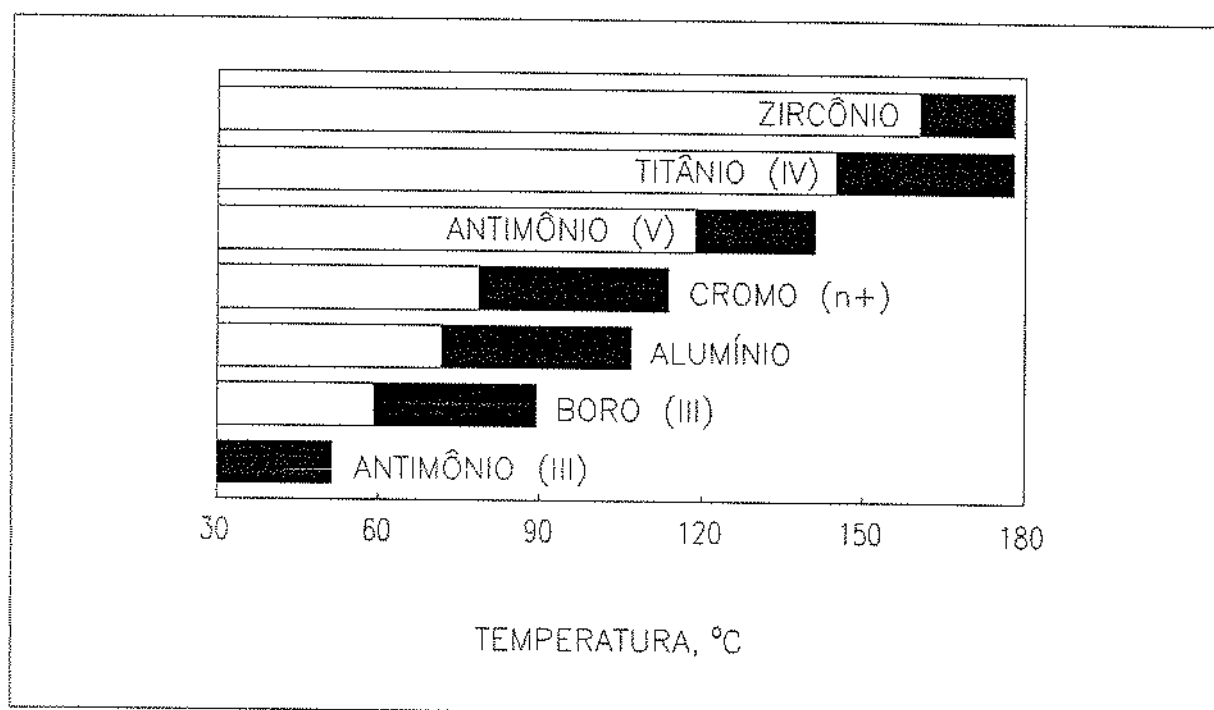


Figura 4: Faixa limite de temperatura para diversos íons metálicos reticuladores

Uma solução regularmente empregada nas operações de fraturamento hidráulico, é composta pelo polímero HPG (hidroxipropilgumar) reticulado com sais de borato. O gel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>O termo gel de fraturamento é empregado para designar o fluido gerado a partir de uma solução polimérica.

formado é estável até aproximadamente  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $225\text{ }^{\circ}\text{F}$ ). Temperaturas acima desta causam perda irreversível de viscosidade devido a degradação do polímero [24].

Outros aditivos ainda são empregados no preparo do gel. Os mais usuais são os quebradores, redutores de filtrado, surfactantes, estabilizadores de argila.

A concentração do polímero também é um fator que influencia no desempenho do gel. Géis mais concentrados são mais viscosos e têm melhor capacidade de sustentação de sólidos em suspensão, mas também são mais caros. Em função disto a concentração pode ser alterada, a fim de atender as necessidades de cada uma das diversas fases de uma operação a um custo reduzido. Em algumas situações o gel pode ser linear, isto é, não reticulado [16].

O fluido a ser ensaiado, objeto deste trabalho, é uma solução do polímero HPG em água na concentração de  $3,6\text{ kg}/\text{m}^3$ , na forma linear e na forma reticulada.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Evolução da filtração aplicada a fratura

A análise da filtração de suspensões que formam reboco é feita tradicionalmente com base na teoria simplificada da filtração . McCabe partindo da equação de Kozeny mostra uma solução para a perda de filtrado em relação ao tempo, que inclui o caso de reboco compressível, onde  $V = f(\sqrt{t})$ . Os parâmetros  $\alpha_w$  e  $R_m$ , que definem as características do reboco e do meio filtrante, são obtidos experimentalmente em laboratório.

Carter, o primeiro a desenvolver um modelo para propagação de uma fratura hidráulica, partiu de uma expressão para a perda de filtrado nas faces da fratura semelhante àquela que resulta da teoria simplificada da filtração :  $V = C(\sqrt{t})$ , onde  $C$  foi definido como coeficiente do fluido de fraturamento e depende das propriedades do fluido em uso e do fluido e da rocha do reservatório. Posteriormente foi introduzida uma modificação nesta expressão, de modo a contemplar um fenômeno observado em um grande número de ensaios padronizados de filtração . A expressão passou a ser  $V = V_s + C(\sqrt{t})$ , onde  $V_s$  representa uma perda instantânea de filtrado.

Howard e Fast, desdobraram o coeficiente  $C$  em três outros coeficientes,  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ , referentes respectivamente aos efeitos da viscosidade do filtrado, da viscosidade e compressibilidade do fluido do reservatório e por último, do crescimento do reboco na face da fratura. Recomendou que, embora estes efeitos se manifestem ao mesmo tempo, fosse levado à equação apenas o coeficiente que se referisse ao efeito predominante.

Williams apresentou uma contribuição significativa ao estabelecer um método para combinar estes três coeficientes.

Alguns modelos de propagação da fratura que sucederam o de Carter continu-

aram adotando a mesma equação para descrever a perda de filtrado na fratura, reforçando assim o uso de coeficientes para descrever a interação do fluido de fraturamento com o reservatório. Com o desenvolvimento de simuladores numéricos e modelos mais complexos de propagação de fratura surgiram novas equações relacionando  $V$  e  $t$  [14]. Modelos como os de Poulsen e Medlin foram desenvolvidos com este intuito, de melhor descrever a filtração e permitir a otimização do projeto de fraturamento.

## 2.2 Filtração dinâmica em laboratório

Nas análises de perda de filtrado em laboratório, o objetivo principal é obter uma previsão do volume de fluido perdido durante uma operação real de fraturamento. São três os métodos mais empregados nos simuladores de fraturamento. O primeiro, mais usual, considera apenas o volume perdido instantaneamente  $V_s$  e o coeficiente  $C_3$  característicos de um determinado fluido e reservatório. O segundo, permite a entrada de mais de um conjunto de parâmetros do fluido. Finalmente o terceiro admite a variação contínua do coeficiente de filtração, conforme o ambiente na fratura. No primeiro caso, dados de testes estáticos são normalmente empregados. De qualquer modo é possível utilizar dados de testes dinâmicos neste tipo de simulador por meio do uso de uma técnica de média que calcula um  $C_3$  a partir do volume projetado de filtrado [16].

Hall e Dollarhide [2] foram aqueles que primeiro investigaram a filtração de fluidos de fraturamento em condição dinâmica.

Foi utilizada uma célula de filtração com geometria anular (fig. 5). Neste tipo de arranjo, o fluido percorre o espaço anular formado entre um tubo externo e o plugue cilíndrico, oco, colocado internamente, enquanto o filtrado atravessa a parede do plugue e é coletado.

O fluido utilizado inicialmente foi uma mistura de querosene com um agente foador de reboco. Os resultados mostraram que o volume de filtrado obtido em condição



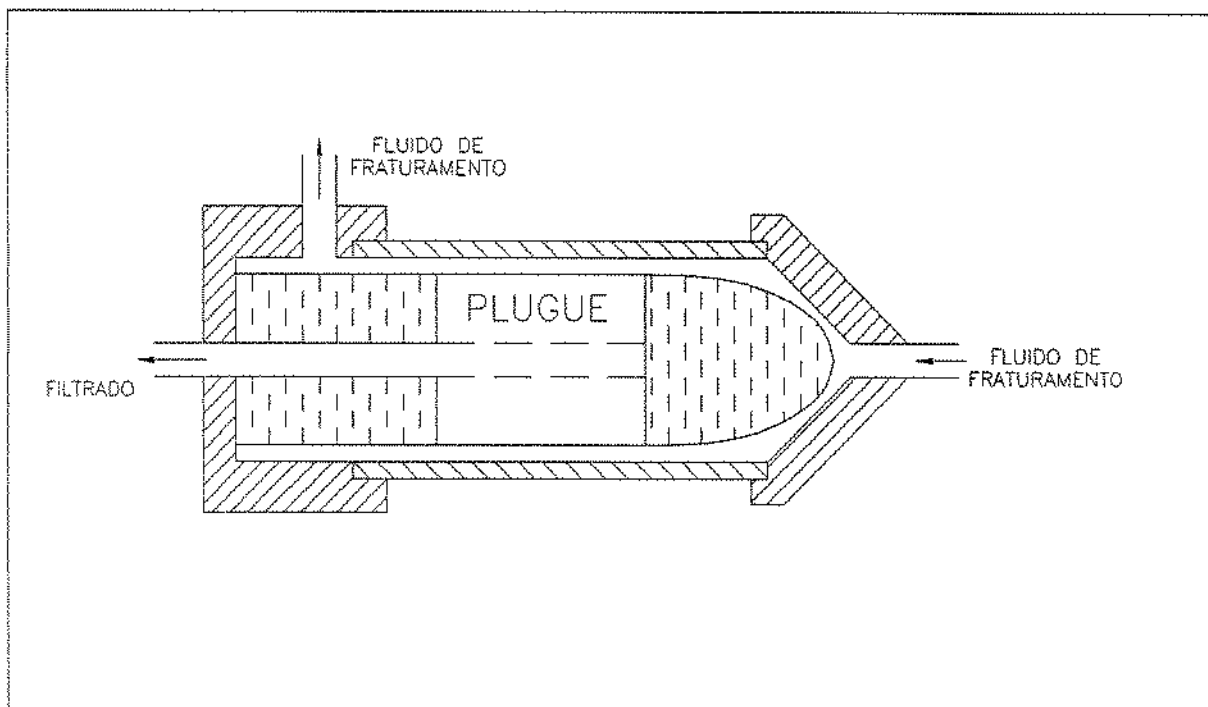


Figura 5: Célula de escoamento radial utilizada no trabalho de Hall e Dollarhide

dinâmica era melhor representado como proporcional a  $t$ .

Este fato chamou a atenção dos pesquisadores que até então, baseados na teoria simplificada da filtração estática, assumiam a relação proposta por Carter, isto é,  $V = f(\sqrt{t})$ .

Testes dinâmicos realizados mais tarde [3], respectivamente com óleo e água acrescidos de um agente formador de reboco, indicaram que a relação entre o volume de filtrado e o tempo dependia do tipo de fluido e de reboco. Os resultados experimentais obtidos com o óleo obedeceram a função  $V = f(\sqrt{t})$ , enquanto que para a água o volume de filtrado passou a ser proporcional a  $t$  na medida que se desenvolvia a filtração.

Os investigadores que se sucederam procuraram simular com maior exatidão as condições reais de escoamento em uma fratura (downhole conditions) [4][5][6][7][8][9][11][13][15][22]. Foram utilizados fluidos de uso comum em fraturamentos tais como as soluções poliméricas em água em diversas concentrações; analisados os efeitos da reti-

culação do fluido, permeabilidade da formação, tipos diferentes de redutores de filtrado; variada a taxa de cisalhamento, temperatura, queda de pressão, história do cisalhamento, tipo de célula, etc..

Idealmente  $C_3$  deve variar com a raiz quadrada da queda de pressão; Isto porém só é verdade para o reboco cuja permeabilidade é constante. Os dados de Roodhart[8] indicaram que um gel linear contendo sílica flour (aditivo particulado) e um gel reticulado contendo diesel são incompressíveis para  $\Delta P$  acima de 580 psi (3,5 MPa) e que para um diferencial abaixo de 220 psi (1,5 MPa) o reboco é compressível e a permeabilidade é inversamente proporcional a  $\Delta P$ . Por sua vez, testes realizados por Ford e Penny [7] indicaram que o reboco com ou sem aditivos particulados é compressível para qualquer valor de  $\Delta P$ , mantendo  $C_3$  uma dependência de  $\Delta P^{1/6}$ .

É geralmente aceito que géis lineares feitos a base de HPG fornecem perfis de filtrado que são independentes da taxa de cisalhamento. Gulbis[5], Harris e Penny [15] observaram que o perfil de filtrado de HPG a  $4,8 \text{ kg/m}^3$  é idêntico para taxas de cisalhamento variando de 0 a  $300 \text{ s}^{-1}$ . Por outro lado vários relatórios de diversos autores [10], [5] e [15] indicaram que o perfil de filtrado de fluidos reticulados é dependente da taxa de cisalhamento. No trabalho de McDaniel[11] a taxa de filtração cresce com o aumento da taxa de cisalhamento de 0 a  $123 \text{ s}^{-1}$ . Ford e Penny [7] relatam que à medida que  $\Delta P$  diminui de 1000 psi (6,9 MPa) para 10 psi (0,07 MPa) o expoente de  $t$  passa de 0,5 a 1, isto é nos casos de baixo  $\Delta P$  o volume de filtrado é proporcional ao tempo.

O efeito da temperatura se faz sentir tanto no volume perdido inicialmente  $V_s$ , como na taxa de crescimento do volume de filtrado. Na primeira fase, o responsável é a variação da viscosidade do gel com a temperatura. Após a formação do reboco é a viscosidade do filtrado quem controla as variações de  $C_3$ .

Os resultados obtidos na grande maioria dos trabalhos confirmam a necessidade de se fazer testes dinâmicos em lugar de testes estáticos quando o fluido é capaz de formar reboco, especialmente quando o fluido contém aditivos redutores de filtrado.

As análises de desempenho de aditivos indicaram que nos testes dinâmicos os aditivos regularmente usados são menos eficientes. Contudo, a comparação objetiva destes resultados fica prejudicada, tendo em vista as variações na geometria da célula de filtração, no arranjo dos equipamentos e nos procedimentos de teste.

Apesar do esforço já dedicado ao problema da filtração dinâmica, ainda não foi estabelecido um procedimento ideal de análise da filtração de fluidos de fraturamento.

Penny e Conway [16] em um de seus trabalhos mais recentes sobre o assunto procuram destacar a padronização dos testes de modo a garantir uma maior representatividade dos resultados. Os fatores que devem ser padronizados são o tempo de teste, a pressão diferencial e a taxa de cisalhamento. A proposta de Conway é de que o tempo deva ser de 90 minutos, a pressão diferencial de 1000 psi (6,9 MPa) e a taxa de cisalhamento de  $100 \text{ s}^{-1}$  para a região do vértice da fratura e de  $40 \text{ s}^{-1}$  para o restante da fratura. Um diferencial de 1000 psi (6,9 MPa) é o mais aceito porque representa a maioria das situações de campo. É importante padronizar o diferencial de pressão principalmente em casos de testes dinâmicos porque  $\Delta P$  e a taxa de cisalhamento estão interrelacionados influenciando ambos a taxa de crescimento do reboco. Quanto à temperatura é recomendado que seja escolhida a que representa a temperatura na maior parte da fratura. Recentemente Penny sugeriu que seja tomada em um ponto a 15 m de distância do poço.

## 2.3 Modelos

### 2.3.1 D. K. Poulsen, Halliburton Services

Poulsen estendeu o modelo de Howard e Fast para a filtração de fluidos na fratura, para atender os casos onde a pressão ou as propriedades do fluido variam durante a filtração.

A partir da lei de Darcy aplicada ao reboco e ao filtro e da equação da difusividade linear para pressão constante aplicada ao reservatório (zona não invadida) (fig. 6),

são definidas as resistências  $R_w$ ,  $R_v$  e  $R_c$  características de cada um destes meios. Estas resistências estão arranjadas em série e portanto a queda de pressão total é dada pela soma das quedas individuais em cada um dos meios. Assumindo que a velocidade do filtrado não depende do meio, que a queda de pressão em cada zona é igual ao produto da velocidade pela resistência, chega-se à expressão

$$\frac{1}{\alpha_{wv}^2} \left( \frac{v}{2} V \right)^2 - \left( 2\Delta P + \left( \frac{\alpha_{wv}}{\alpha_c} \right)^2 \right) \left( \frac{v}{2} V \right) + \alpha_{wv}^2 \Delta P^2 = 0 \quad (1)$$

onde

$$\alpha_c = \sqrt{\frac{V}{2R_c \Delta P_c}} = \sqrt{\frac{\phi c_f k_c}{\pi \mu_c}}$$

$$\alpha_v = \sqrt{\frac{V}{2R_v}} = \sqrt{\frac{\phi k_v}{2\mu}}$$

$$\alpha_w = \sqrt{\frac{V}{2R_w}} = \sqrt{\frac{k_w}{2\nu \mu}}$$

$$\alpha_{wv}^2 = \frac{\alpha_w^2 \alpha_v^2}{\alpha_w^2 + \alpha_v^2}$$

Os parâmetros  $\alpha_v$  e  $\alpha_w$  são obtidos experimentalmente a partir de um ensaio de filtração, enquanto  $\alpha_c$  é dado pelas propriedades do reservatório.

Resolvendo a equação (1) chega-se a uma expressão para a velocidade do filtrado

$$v = \frac{2}{V} \left( \frac{2\alpha_c \Delta P}{1 + \sqrt{1 + 4 \left( \frac{\alpha_c}{\alpha_{wv}} \right)^2 \Delta P}} \right)^2 \quad (2)$$

e fazendo a integração determina-se o volume de filtrado

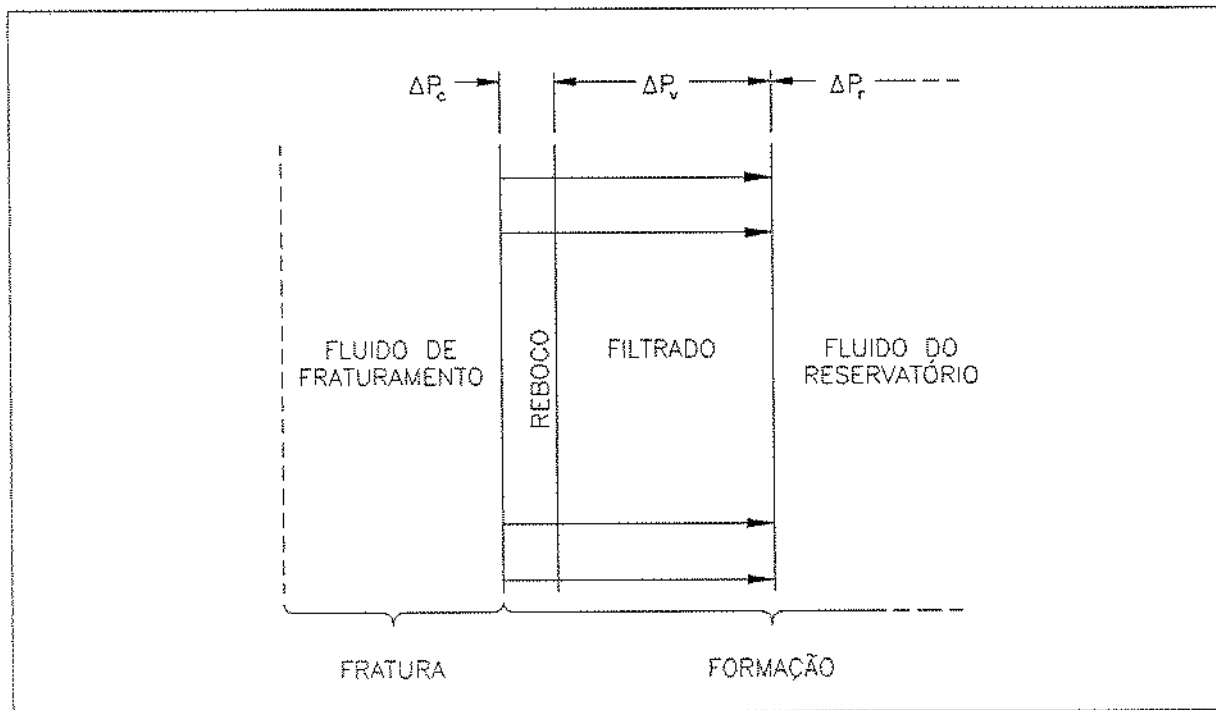


Figura 6: Representação da filtração na fratura conforme o modelo de Poulsen

$$V = 2 \left[ \int_0^t \left( \frac{2\alpha_c \Delta P}{1 + \sqrt{1 + 4 \left( \frac{\alpha_c}{\alpha_{wv}} \right)^2 \Delta P}} \right)^2 dt \right]^{1/2} \quad (3)$$

Em alguns casos esta equação tem solução analítica mas em outros a solução é numérica.

Para o caso mais simples onde a queda de pressão e todas as outras propriedades são constantes a solução é idêntica àquela dada por Williams [10].

O procedimento mostrado acima aplicado à filtração em laboratório fornece uma relação semelhante àquela dada por McCabe [20].

$$R_v V + \frac{V^2}{4\alpha_w^2} = \Delta P t \quad (4)$$

Resolvendo para  $V$ ,

$$V = 2\alpha_w^2 \left( -R_v + \sqrt{R_v^2 + \frac{\Delta P t}{\alpha_w^2}} \right) \quad (5)$$

Poulsen utiliza esta expressão para propor um método de transporte dos resultados de laboratório para o campo. Destaca também como este modelo pode ser usado para reproduzir fenômenos dinâmicos que marcam o início e o fim dos experimentos.

### 2.3.2 W. L. Medlin, Mobil ReD Corp., L. Massé

Medlin apresentou um modelo para representar a filtração de fluidos de fraturamento e fluidos de perfuração. Este modelo divide a filtração em duas fases. Uma fase de invasão (fig. 7) e uma fase de formação do reboco. No início da fase de invasão o escoamento obedece a lei de Darcy. Nesse período, frações de cadeias de polímeros e outros sólidos contidos no fluido penetram no meio poroso, próximo da sua face exposta. A fase de invasão termina quando a quantidade de sólidos acumulados na face do filtro é suficiente para formar um reboco.

Os autores propuseram a hipótese de que a queda de pressão no reboco é proporcional ao produto da taxa de filtração pelo volume acumulado de filtrado. Assim para a fase inicial quando  $V \leq V_0$ , temos

$$P_a - P_w = 0 \quad (6)$$

Admitindo que no início da filtração o escoamento de filtrado se dê conforme a lei de Darcy,

$$P_w = \frac{LQ\mu}{kA} \quad (7)$$

chegamos a uma expressão para o volume de filtrado

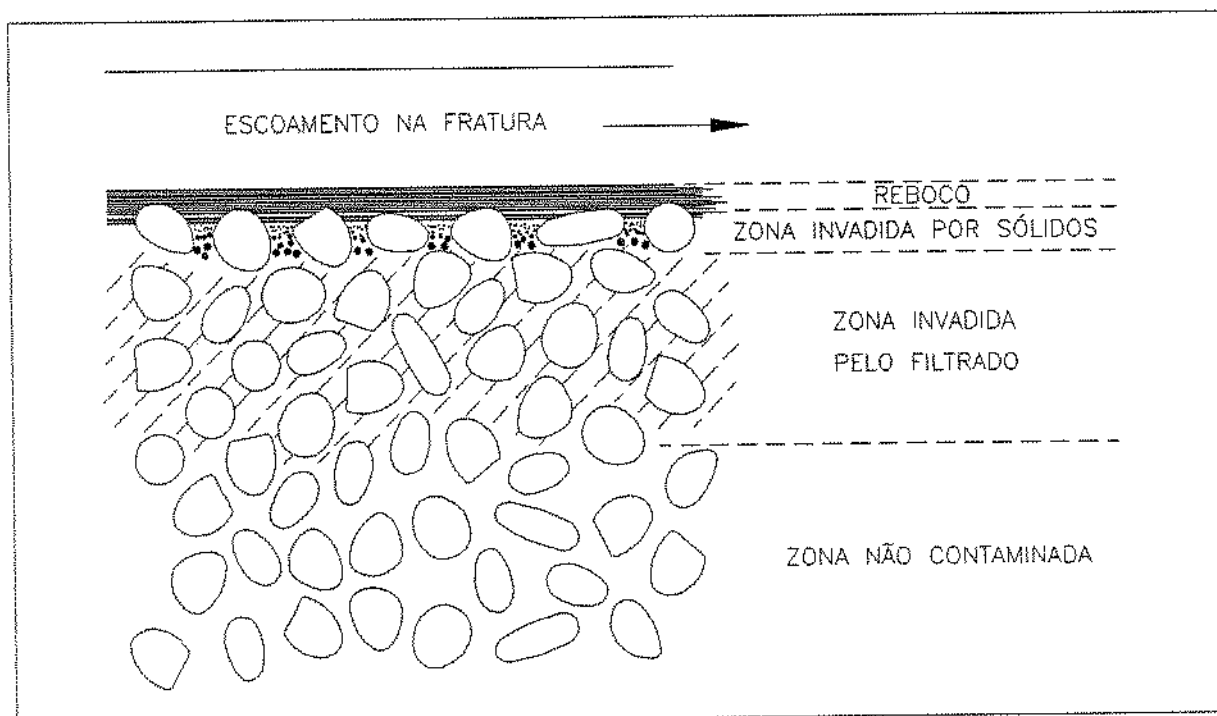


Figura 7: Invasão de sólidos no meio poroso

$$V = \left( \frac{\lambda P_a A}{L} \right) t \quad (8)$$

onde a mobilidade dada por  $\lambda = k/\mu$ , é considerada constante.

Na medida que o escoamento prossegue, ocorre uma invasão de sólidos que tende a reduzir a permeabilidade do filtro. Além disso a viscosidade do filtrado na zona invadida é superior à do fluido que satura o filtro contribuindo também para a redução da mobilidade do filtrado. Este processo termina com a formação de um reboco na face do plugue que impede a passagem de qualquer outro sólido para o interior do filtro. Deste ponto em diante, é assumido que não há mais alteração da mobilidade e

$$P_a - P_w = \left( \frac{1}{aA^2} \right) (V - V_0) Q \quad (9)$$

para  $V > V_0$ . Substituindo  $P_w$  dado pela equação de Darcy, na equação acima, obtemos

uma expressão para o volume de filtrado na fase de formação do reboco

$$P_a = \frac{1}{aA^2} V \frac{dV}{dt} + \frac{1}{A} \left( \frac{L}{\lambda} - \frac{V_0}{A} \right) \frac{dV}{dt} \quad (10)$$

A integração desta equação entre os limites  $t_0$  e  $t$  resultam no seguinte polinômio do segundo grau

$$t = \frac{\alpha}{A^2} (V - V_0)^2 + \frac{\beta}{A} (V - V_0) + \gamma \quad (11)$$

onde

$$\alpha = \frac{1}{(2aP_a)} \quad (12)$$

$$\beta = \frac{L}{(\lambda P_a)} \quad (13)$$

$$\gamma = t_0 \quad (14)$$

Medlin com base na expressão (11) propõe um procedimento para a obtenção dos coeficientes  $\alpha, \beta, \gamma$  a partir dos dados de um ensaio de filtração .



## **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **3.1 A prática corrente e o Simulador**

A realização de ensaios de filtração tem sido uma prática comum na técnica de fraturamento hidráulico. O ensaio de filtração mais usual consiste em se fazer passar o fluido, na pressão e temperatura desejada, através de um filtro. Estes podem ser plugues obtidos da própria rocha a ser fraturada ou filtros de papel. A utilização de plugues em lugar do filtro de papel, permite que seja considerado além do reboco, também o efeito da interação do fluido com a rocha. Neste tipo de ensaio os coeficientes obtidos, seja qual for o modelo adotado, refletem com mais exatidão os mecanismos envolvidos na filtração durante a operação de fraturamento hidráulico.

Os ensaios no simulador diferem da prática usual porque o simulador permite que o fluido seja condicionado antes de atingir a célula e que a filtração ocorra em condições de escoamento semelhantes àquelas encontradas em uma fratura.

### **3.2 Preparo dos Plugues para Ensaio de Filtração**

A presença de argila e as variações na constituição física e mineralógica dos plugues naturais levam a resultados de filtração não confiáveis e pouco reprodutíveis [31]. Nesse estudo foram utilizados plugues sintéticos cortados de blocos cerâmicos, de dimensões aproximadas 20 x 20 x 5 cm, feitos a partir da alumina. A tecnologia para a fabricação destes blocos foi desenvolvida pelo CENPES em cooperação com a empresa Engocer. O plugues obtidos desta forma apresentam elevada resistência térmica e mecânica e propriedades petrofísicas controladas.

Para permitir a adequação ao equipamento de filtração do laboratório os plugues devem ter o diâmetro de 2,5 ou de 3,8 cm. Os plugues de maior área permitem,

observadas as mesmas condições , a obtenção de um volume de filtrado mais elevado, indispensável para a sua caracterização reológica. Entretanto em função da reduzida quantidade de blocos disponíveis, foi decidido utilizar plugues de 2,5 cm de diâmetro.

Inicialmente foram cortados 16 plugues com uma broca de 3,4 cm de diâmetro. A porosidade e a permeabilidade dos plugues foram determinadas no laboratório de petrofísica do CENPES/DIGER e da UNICAMP.

O preparo prosseguiu com os plugues sendo levados para um dessecador contendo uma solução de cloreto de potássio a 2% , onde permaneceram por um período de aproximadamente 24 horas até sua completa saturação .

A partir daí os plugues estavam prontos para o ensaio na célula de filtração .

### 3.3 Preparo do Fluido para Ensaio de Filtração

O fluido de fraturamento pode ter diferentes composições . Neste trabalho foi escolhido um fluido a base de HPG na concentração de  $3,6 \text{ kg/m}^3$ .

As soluções foram preparadas com os mesmos aditivos empregados no preparo dos fluidos de fraturamento hidráulico no campo. O reticulador empregado foi o ácido bórico e o ativador a soda cáustica. Foram utilizados ainda, inibidor de argila, desemulsificante e bactericida.

Uma sequência única para a adição dos produtos químicos foi mantida em todas as bateladas. Primeiramente eram adicionados cada um dos aditivos e por fim o polímero. A solução permanecia em agitação até que o polímero ficasse completamente hidratado. No caso de fluido reticulado, após a hidratação era adicionado o ativador. Esta padronização é recomendada [16] para evitar diferenças na qualidade do fluido que possam interferir na filtração .

No caso de fluido de fraturamento é utilizado um quebrador de gel (oxidante). O quebrador desempenha um papel importante na filtração porque altera as propriedades

do fluido com o tempo. Neste estudo não foi utilizado o quebrador para que se pudesse ter mais tempo para efetuar o ensaio, mantendo as propriedades do fluido inicial. Deste modo a análise se limita à fase inicial de um fraturamento, enquanto o quebrador ainda não alterou significativamente as características do fluido.

### 3.4 A Célula de Filtração

A célula de filtração é o dispositivo onde se aloja o plugue que é o meio filtrante. Estes devem ter 2,5 ou 3,8 cm de diâmetro e comprimento de até 7,5 cm. A célula foi confeccionada em aço inox 316 e foi especificada para trabalhar com pressões de até 30 MPa e temperatura de 250 °C. Possui ainda um sistema que permite o confinamento do plugue através de uma camisa de borracha quando submetida a um diferencial de pressão positivo. O fluido admitido na célula de filtração escoam paralelamente à face do plugue e o diferencial de pressão mantido entre as duas faces do plugue faz com que ocorra a filtração. A figura 8 mostra o desenho da célula e seus principais componentes.

A velocidade média do escoamento paralelo à face do plugue no interior da célula é controlada pela vazão de bombeio e pela distância da face do plugue à extremidade da célula. Esta distância pode ser modificada através de anéis metálicos espaçadores.

### 3.5 O Simulador Físico de Dano

O simulador é composto de tanques de fluido, vasos de pressão, bombas de líquidos, cilindros de  $N_2$ , estufa, válvulas reguladoras de contrapressão, manômetros e transdutores de pressão. O projeto e a construção se desenvolveu no CENPES, com o objetivo de prover aquele órgão de um instrumento para avaliar a perda de filtrado ou o dano causado pela injeção de fluidos em um meio poroso. Em função dos recursos disponíveis o simulador está limitado a uma pressão máxima de trabalho de 14,5 MPa e temperatura de 120 °C. Estas características permitiram que fossem conduzidos neste

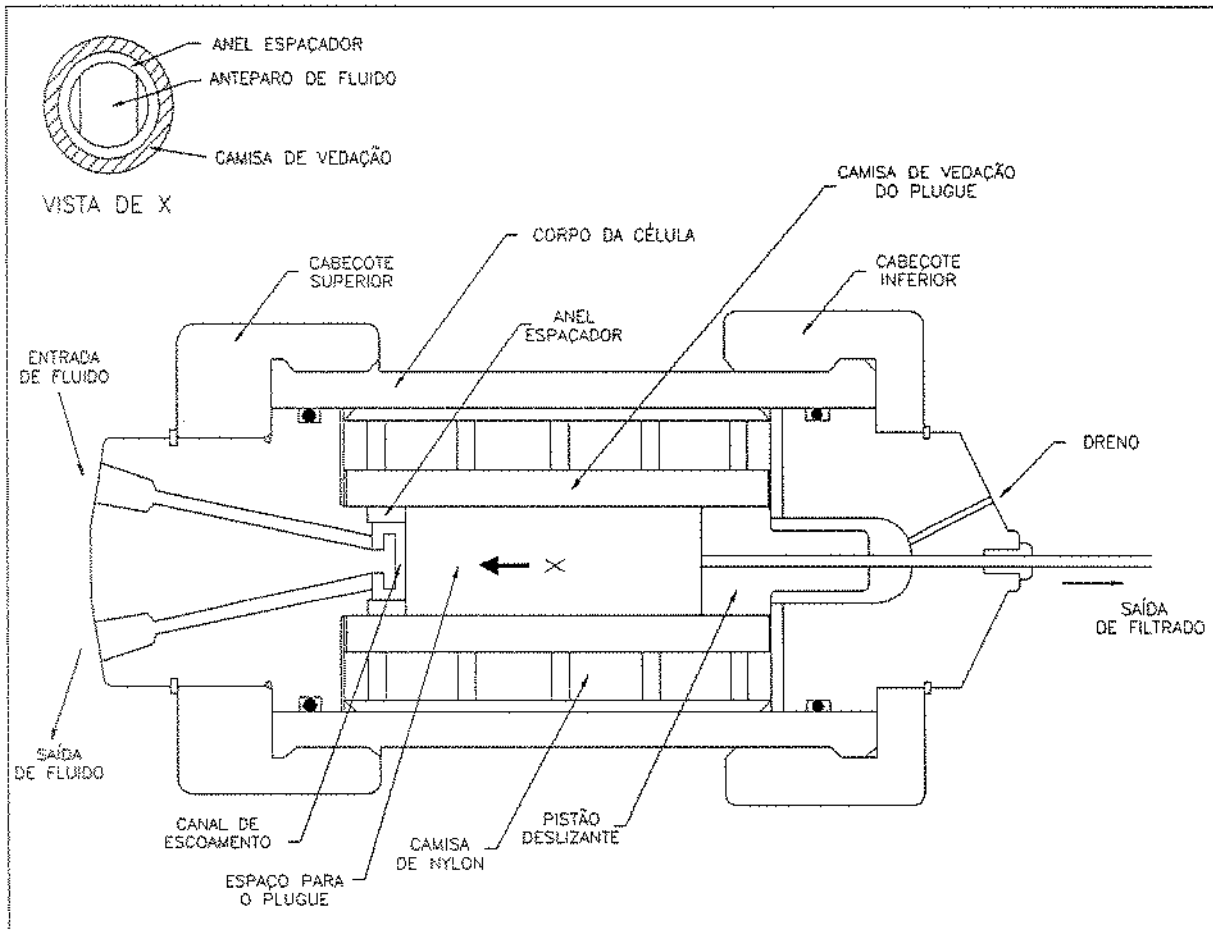


Figura 8: Representação da célula de filtração

equipamento os ensaios de filtração objeto deste trabalho.

A figura 9 mostra um esquema dos equipamentos que compõem o simulador físico de dano.

A filtração de gel reticulado foi feita com o auxílio de dois vasos de alta pressão de 3 litros de volume. Estes vasos estão equipados com cintas de aquecimento ligadas a um controlador de temperatura que permite manter o fluido preaquecido. Os vasos são pressurizados com água por meio de uma bomba triplex de deslocamento positivo. A partir destes vasos, o gel percorre uma linha isolada termicamente e atinge a célula no interior da estufa onde a temperatura atinge o valor final. Uma parte do fluido é filtrada e então é coletada em uma balança digital ligada a um sistema de aquisição de dados. O restante do fluido que apenas tangenciou o plugue passa por uma válvula de agulha atuada por mola, que regula a pressão de filtração. Em seguida é coletado em uma segunda balança permitindo que se registre a vazão de circulação. As oscilações de pressão na linha provocadas pela bomba triplex são atenuadas através de um cilindro de amortecimento contendo  $N_2$ , conectado à linha de descarga da bomba. Quanto à filtração de fluido não reticulado, não foi necessário fazer o deslocamento do gel com água. O gel foi colocado diretamente no tanque de sucção da bomba e deslocado para os vasos aquecidos, seguindo a partir daí o mesmo percurso até a célula.

Antes de cada ensaio, o sistema é limpo com água, para remover os detritos acumulados no ensaio anterior e garantir o preenchimento de todas as linhas. Ao dar início ao bombeamento do fluido de fraturamento, a válvula a jusante da célula na linha de filtrado deve permanecer fechada para evitar o começo prematuro da filtração. Nesse período é feita a regulagem da válvula de contrapressão e da estufa, para que se estabeleçam a pressão e temperatura desejadas. Uma vez ajustados estes parâmetros, o fluxo é desviado momentaneamente para o acumulador enquanto a célula é despressurizada. O início da filtração acontece com a abertura da válvula à montante da célula.

A aquisição dos dados é feita por um sistema especializado composto por um

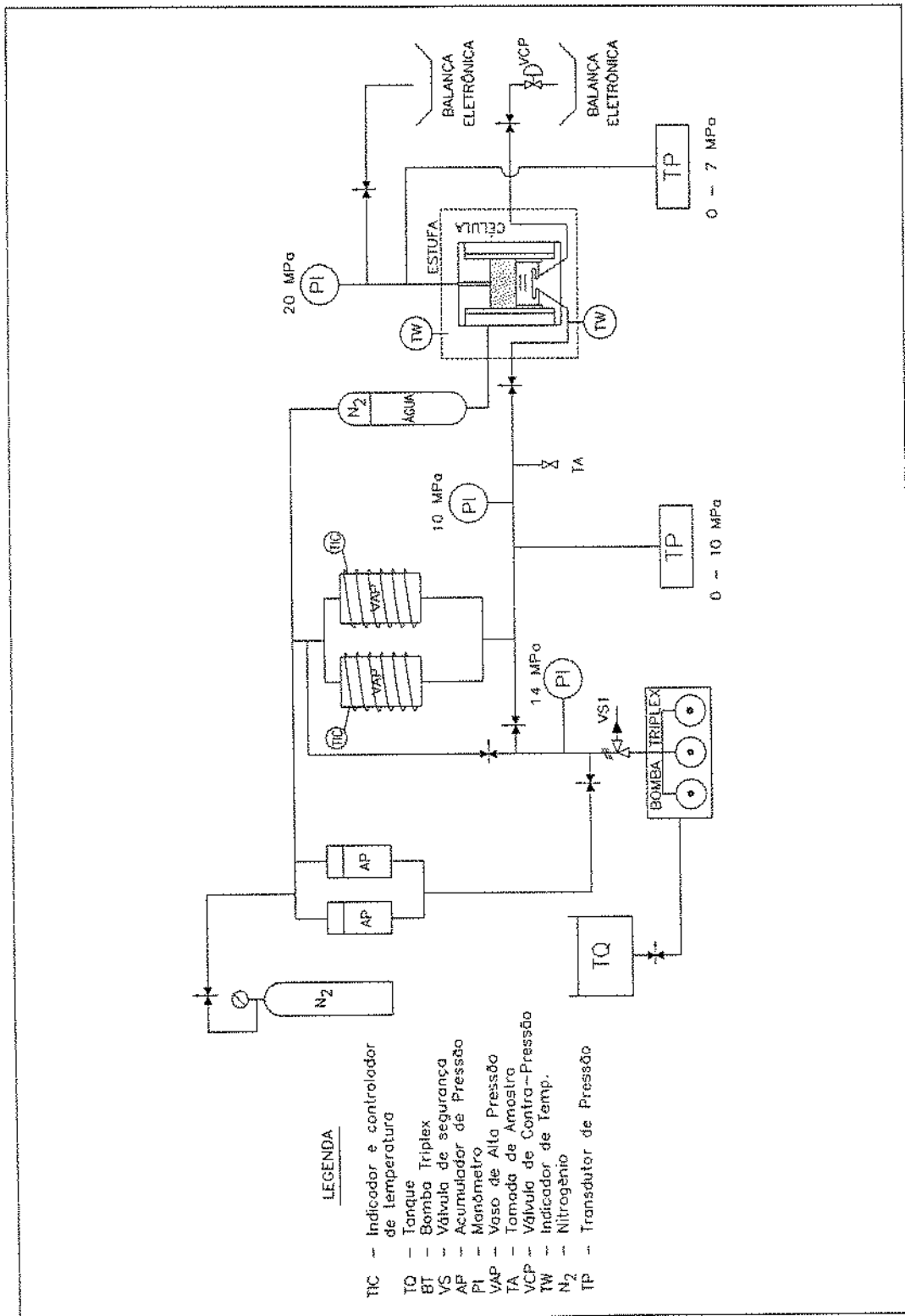


Figura 9: Fluxograma simplificado do Simulador Físico de Dano

micro computador padrão IBM XT equipado com uma placa que recebe os sinais digitais e analógicos dos instrumentos de medida e por um programa que calcula os valores das grandezas conforme as equações de calibração estabelecidas previamente. As leituras são exibidas na tela em tempo real através de gráficos.

Além da massa medida nas duas balanças, o sistema também registra a pressão, medida por um transdutor a montante e outro a jusante da célula, e a temperatura do fluido, medida por um termopar junto à célula.

### 3.6 O Ensaio de Filtração

Ao todo foram realizados 16 ensaios de filtração com a solução aquosa de HPG na concentração de  $3,6 \text{ kg/m}^3$ . Destes, 8 foram feitos com fluido não reticulado e 8 com o fluido reticulado.

O meio filtrante consistiu de pequenos cilindros de cerâmica de 2,5 cm de diâmetro e comprimento variando de 2.5 cm a 4.2 cm. Dentre os blocos cerâmicos disponíveis, foram utilizados os de menor permeabilidade, compatível com aquela das rochas que eventualmente são submetidas a fraturamento hidráulico.

Os parâmetros da filtração, objetos destes ensaios, foram a temperatura do fluido, a pressão de filtração e a vazão de circulação que caracteriza a filtração como dinâmica.

Com o objetivo de se manter próximo das condições vigentes em uma operação real de fraturamento hidráulico, os ensaios se deram com a pressão variando de aproximadamente 3,4 a 6,8 MPa, a temperatura de 25 a 65 graus  $^{\circ}\text{C}$ , e a vazão de circulação de 0,3 a  $1,2 \text{ cm}^3/\text{s}$ . Esta faixa de vazão foi determinada para as dimensões da célula, com base na taxa de deformação aparente, de tal modo que os limites desta ficassem entre 40 e  $100 \text{ s}^{-1}$ . Dentro desta faixa se encontram os valores usuais da taxa de deformação observada na maior parte da fratura em uma operação convencional de fraturamento hidráulico.

As figuras 1 e 2 apresentam os principais parâmetros de cada um dos ensaios, respectivamente com fluido linear e reticulado.

Ensaio	$\Delta P$ (MPa)	T (°C)	Q (cm <sup>3</sup> /s)	k ( $\mu\text{m}^2 10^{-2}$ )	L (cm)
0708	5,1	50	0,5	3,7	3.4
0808	6,4	51	0,5	3,8	3.4
0908A	5,1	40	1,2	4,9	3.4
0908B	5,2	41	0,75	3,5	2.5
0908C	5,2	42	0	3,6	2.5
1008A	5,2	26	0,5	4,2	2.5
1008B	5,2	64	0,5	4,4	2.5
1808B	5,2	52	0,33	32	4.2

Tabela 1: Ensaio de Filtração - Fluido Linear HPG 3,6 kg/m<sup>3</sup>



Ensaio	$\Delta P$ (MPa)	T (°C)	Q (cm <sup>3</sup> /s)	k ( $\mu\text{m}^2 10^{-2}$ )	L (cm)
1208	3,4	51	0,63	4,1	3.4
1308B	5,1	51	0,5	4,3	3.4
1408	6,8	51	0,63	4,4	3.4
1508A	5,2	24	0,63	5,2	3.4
1508B	5,2	63	0,63	4,9	3.4
1608	5,2	50	0	5,1	3.4
1808A	5,2	53	1,2	2,1	3.4
1808C	5,1	51	0,63	27	4.2

Tabela 2: Ensaio de filtração - Fluido Reticulado HPG 3,6 kg/m<sup>3</sup>

## 4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 4.1 A curva de filtração Volume x Tempo

O comportamento mostrado nos ensaios é característico da filtração de soluções a pressão constante. A vazão de filtrado é decrescente em função do crescimento do reboco na face do plugue. Entretanto, na filtração dinâmica, a espessura do reboco tende a um limite, fazendo com que a vazão, a partir deste instante, permaneça constante.

Na fase inicial da filtração predomina a influência das propriedades do plugue. À medida que o reboco se desenvolve a filtração passa a ser controlada pelo reboco e, em alguns casos, a resistência ao escoamento do filtrado no plugue pode ser desprezada.

#### 4.1.1 Fluido Viscoso não Reticulado

Os dados de volume de filtrado e tempo de filtração gerados nos ensaios de filtração com fluido viscoso não reticulado (HPG  $3,6 \text{ kg/m}^3$ ) estão representados nas figuras 10 a 17.

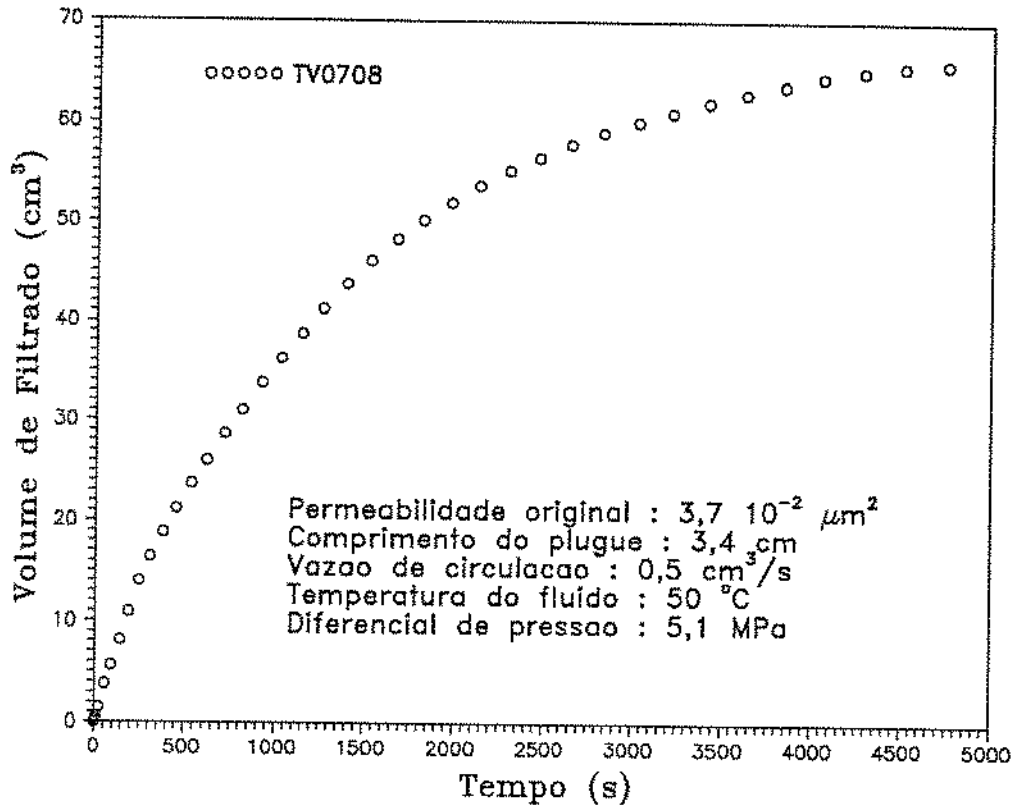


Figura 10: Filtrado acumulado x Tempo (HPG  $3,6 \text{ kg}/\text{m}^3$ )

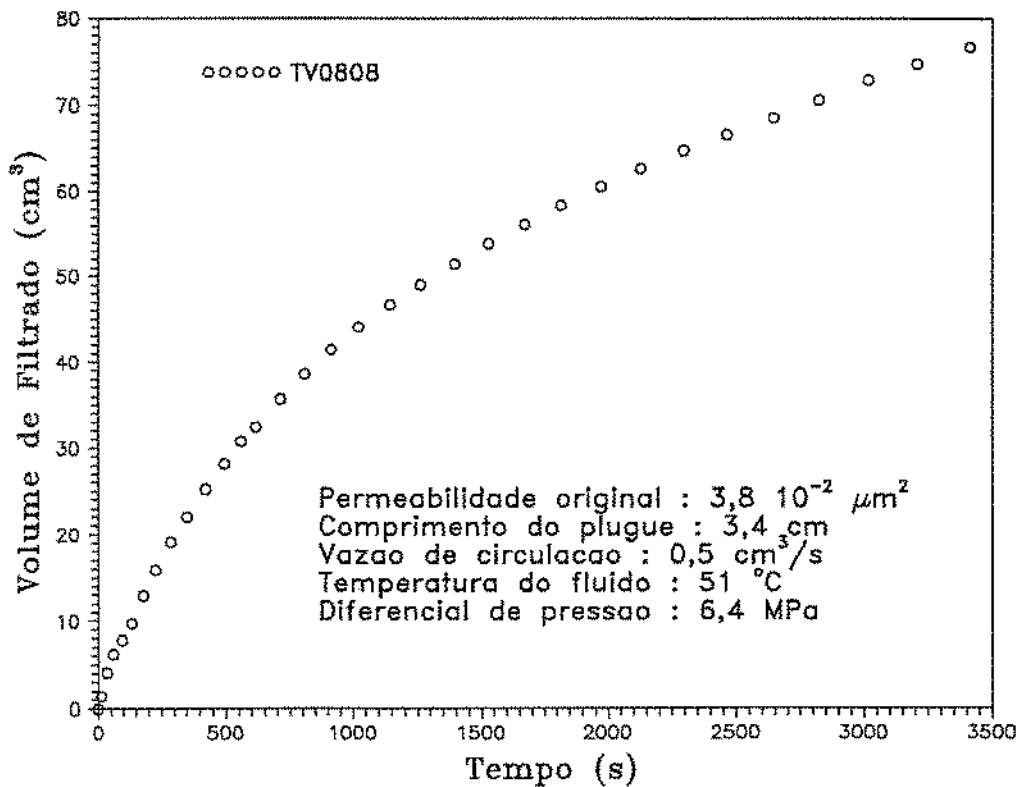


Figura 11: Filtrado acumulado x Tempo (HPG  $3,6 \text{ kg}/\text{m}^3$ )

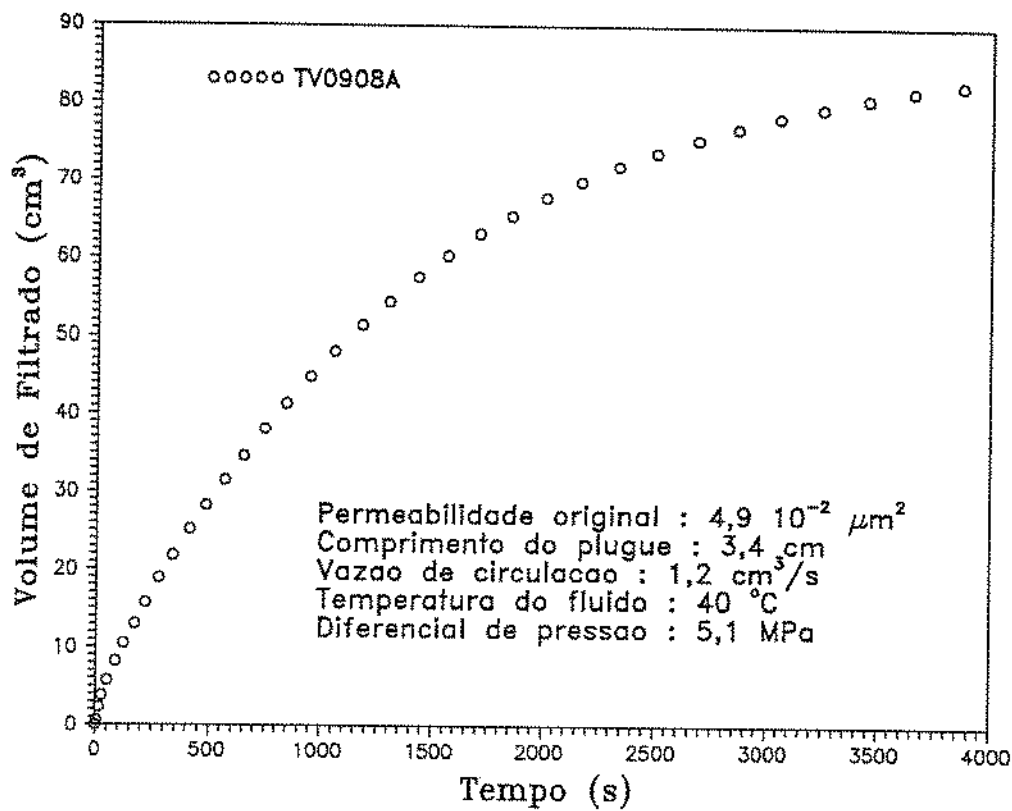


Figura 12: Filtrado acumulado x Tempo (HPG  $3,6 \text{ kg}/\text{m}^3$ )

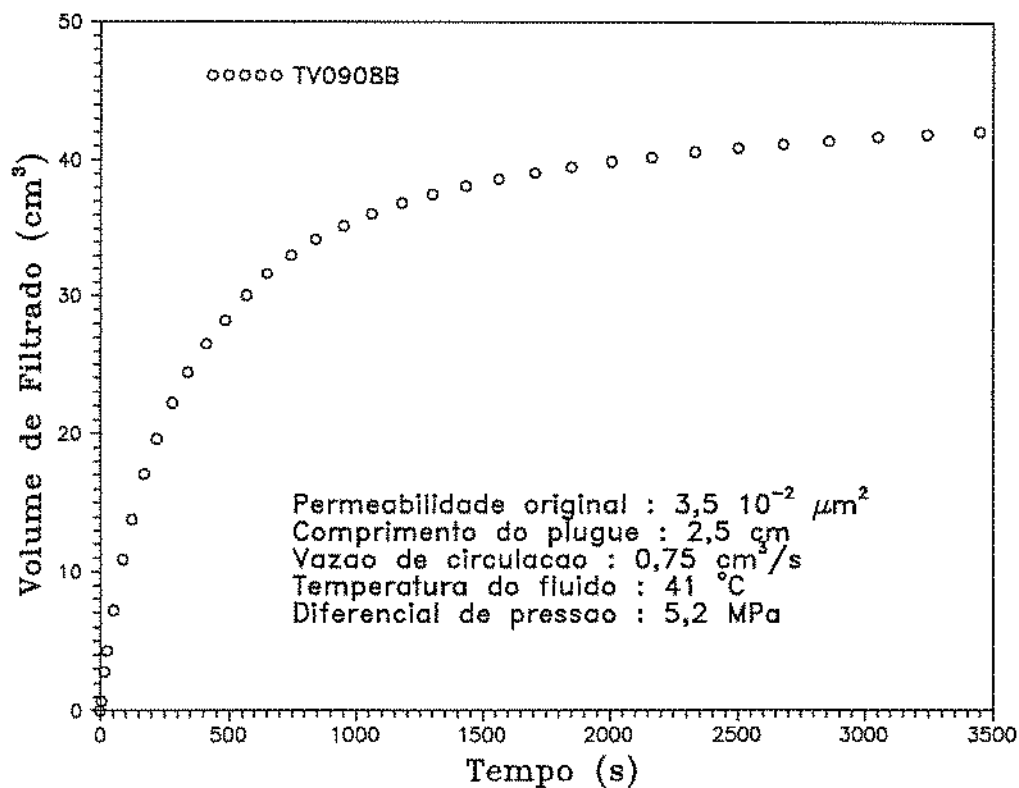


Figura 13: Filtrado acumulado x Tempo (HPG  $3,6 \text{ kg}/\text{m}^3$ )

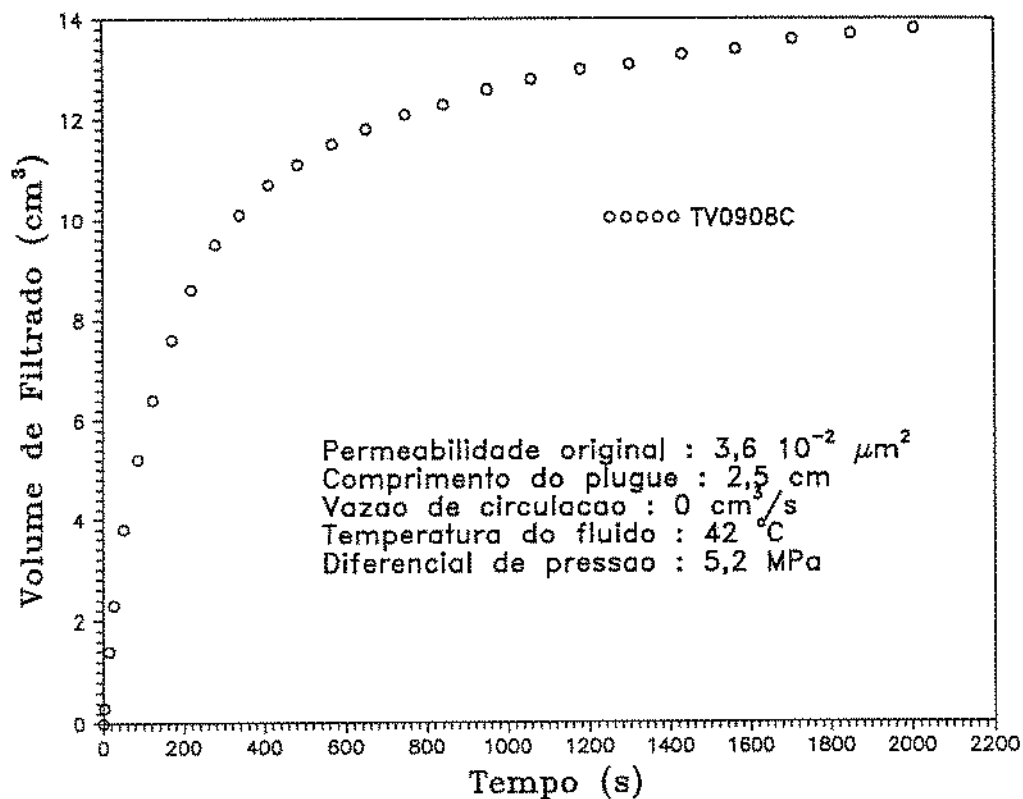


Figura 14: Filtrado acumulado x Tempo (HPG 3,6 kg/m<sup>3</sup>)

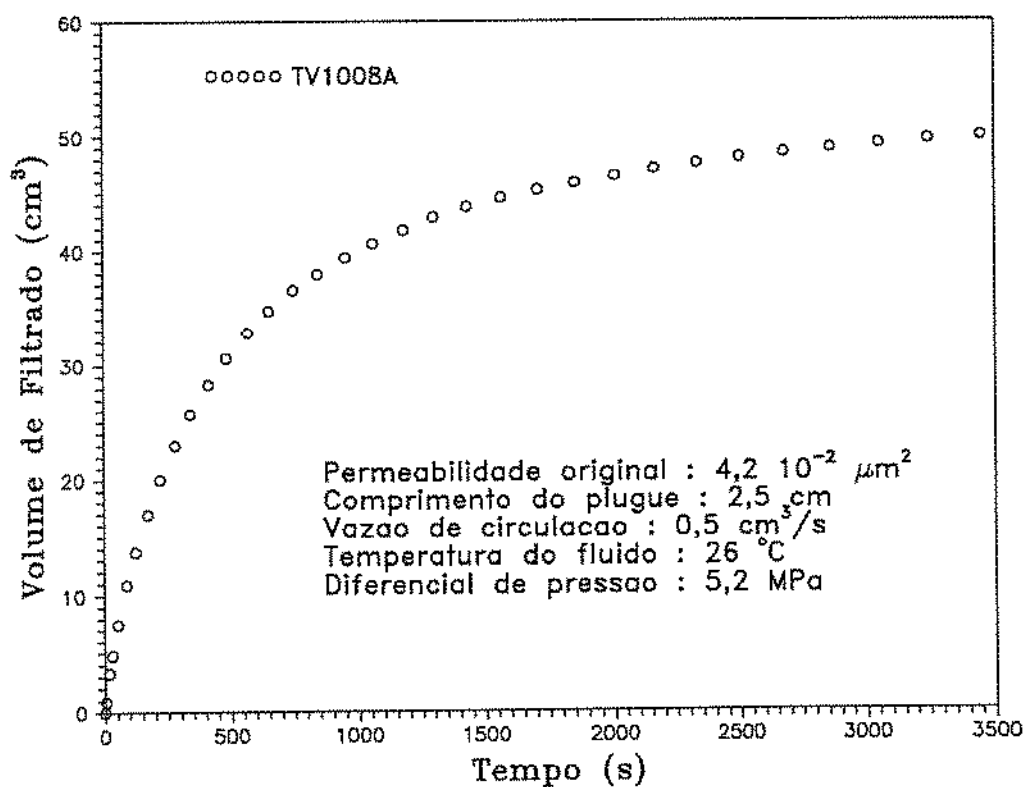


Figura 15: Filtrado acumulado x Tempo (HPG 3,6 kg/m<sup>3</sup>)

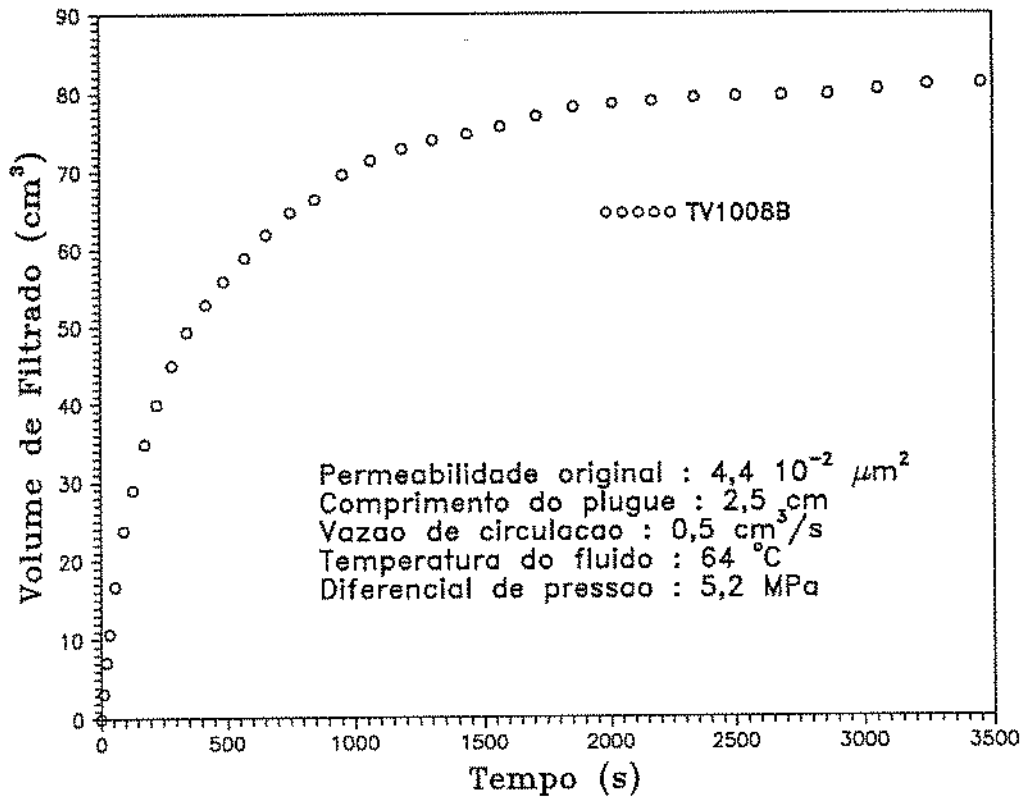


Figura 16: Filtrado acumulado x Tempo (HPG  $3,6 \text{ kg}/\text{m}^3$ )

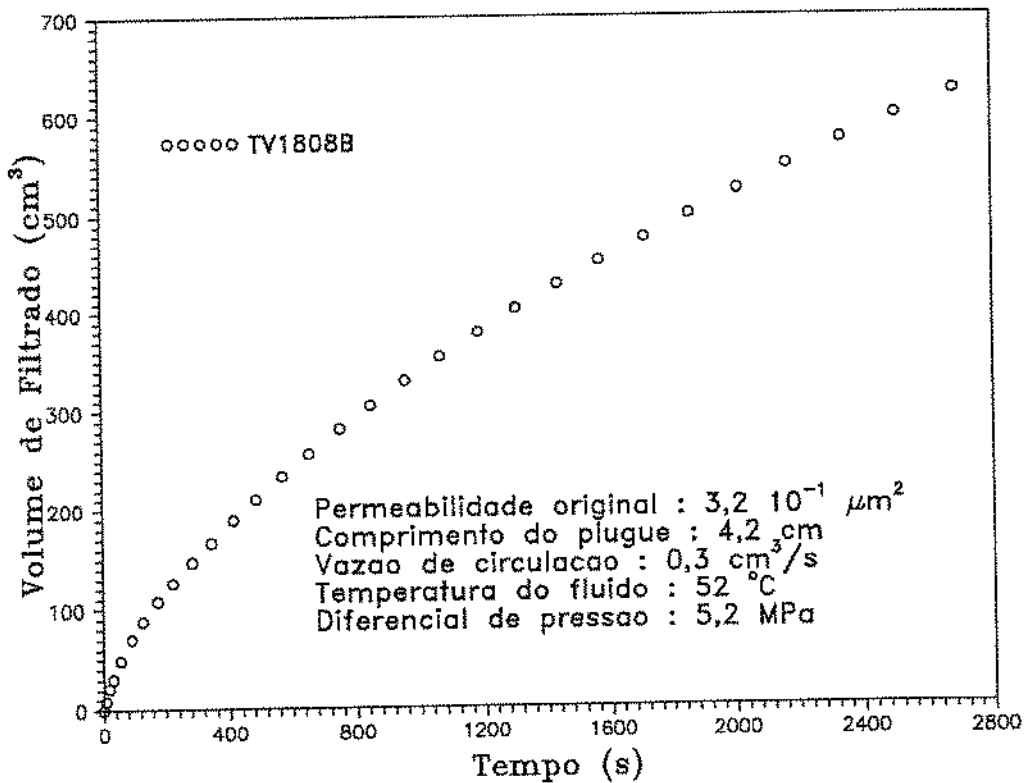


Figura 17: Filtrado acumulado x Tempo (HPG  $3,6 \text{ kg}/\text{m}^3$ )

As figuras 18 a 20 permitem comparar, respectivamente, as curvas de filtração frente a uma variação de pressão, de velocidade do escoamento na célula e de temperatura do ensaio <sup>2</sup>. Tomando como referência o tempo de 2400 segundos, duração aproximada de uma operação de fraturamento hidráulico, a análise destes gráficos revela a importância de se obter os dados de filtração nas mesmas condições encontradas na operação . Por exemplo um ponto na face da fratura, nas imediações do poço, submetido ao escoamento de um fluido similar ao do ensaio: um aumento de pressão de 26% resulta em um acréscimo do volume de filtrado de 18%. Da mesma forma, o volume de filtrado acumulado durante o bombeio do fluido de fraturamento pode superar em até 400% o volume calculado a partir de um teste usualmente feito em condições estáticas. Quanto à temperatura, o volume de filtrado medido à temperatura de fundo é aproximadamente 66% superior àquele medido à temperatura ambiente. O efeito da variação da permeabilidade do filtro é ainda mais crítico e pode ser verificado na figura 21. Assim, nos poços onde ocorrem intercalações de alta permeabilidade é recomendável a adição de agentes controladores de filtrado no fluido de fraturamento.

---

<sup>2</sup>As diferenças encontradas não se devem exclusivamente aos parâmetros citados uma vez que não foi possível fazer a variação de apenas um dos parâmetros em cada ensaio, mantendo os demais constantes. Podemos afirmar que em cada uma das figuras a variação dos outros fatores é menor que a daquele em destaque (tabela 1).

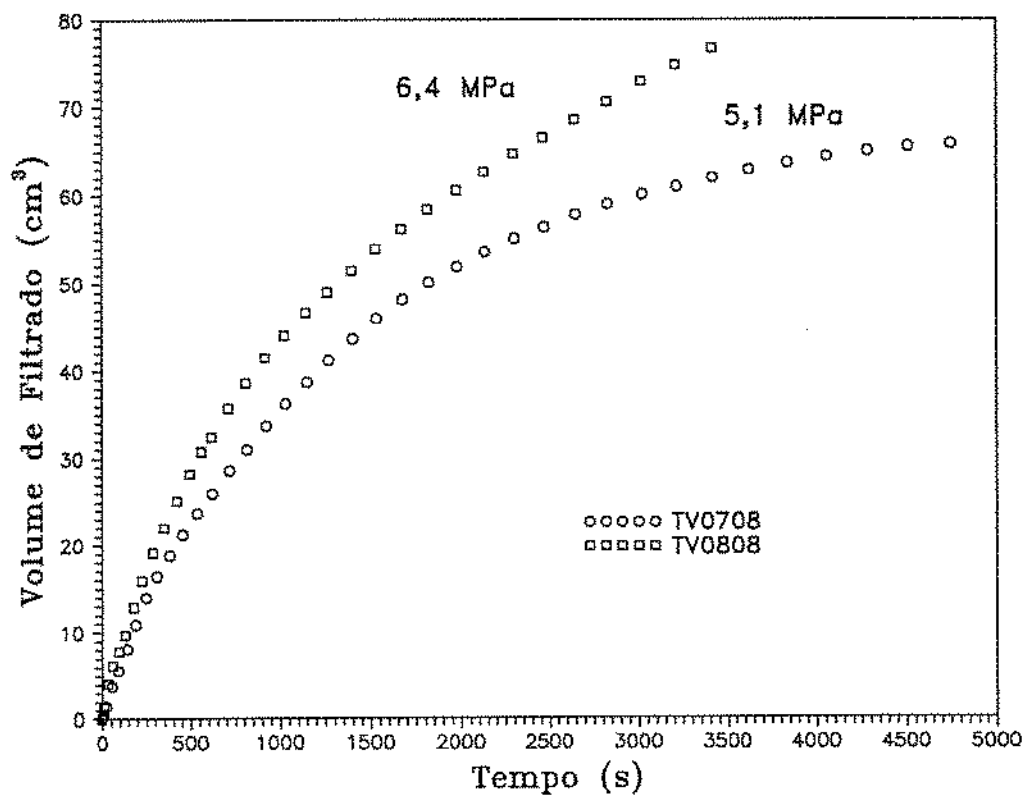


Figura 18: Efeito da pressão (HPG  $3,6 \text{ kg/m}^3$ )



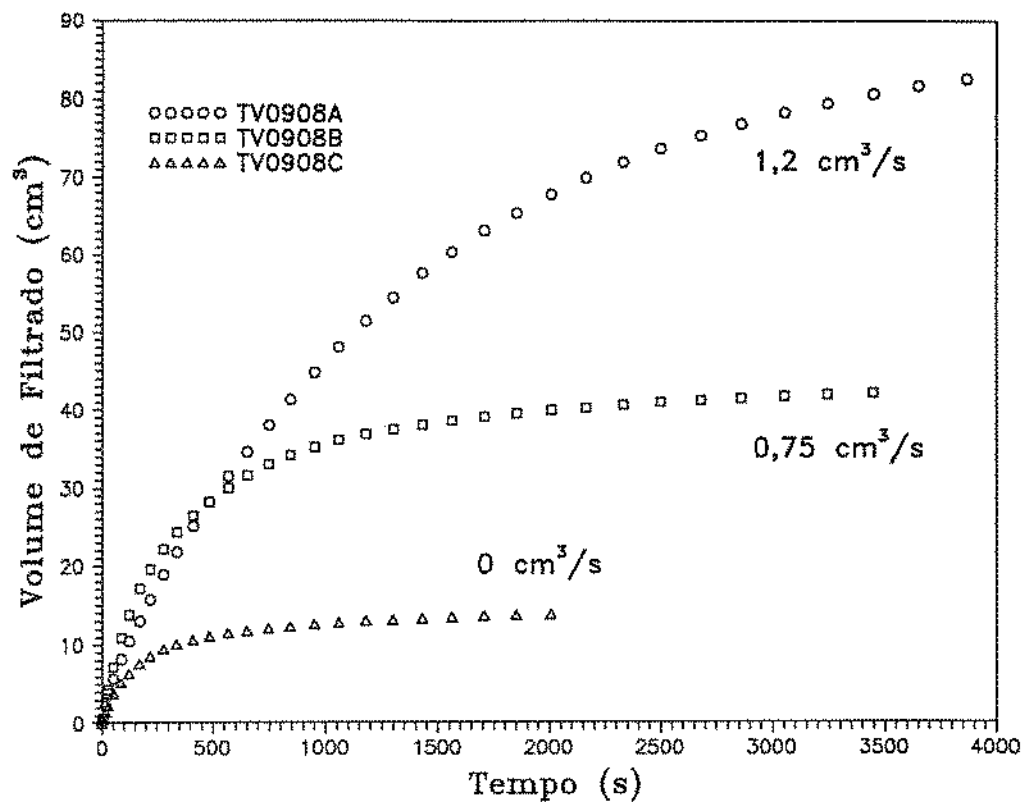


Figura 19: Efeito da vazão de circulação (HPG  $3,6 \text{ kg/m}^3$ )

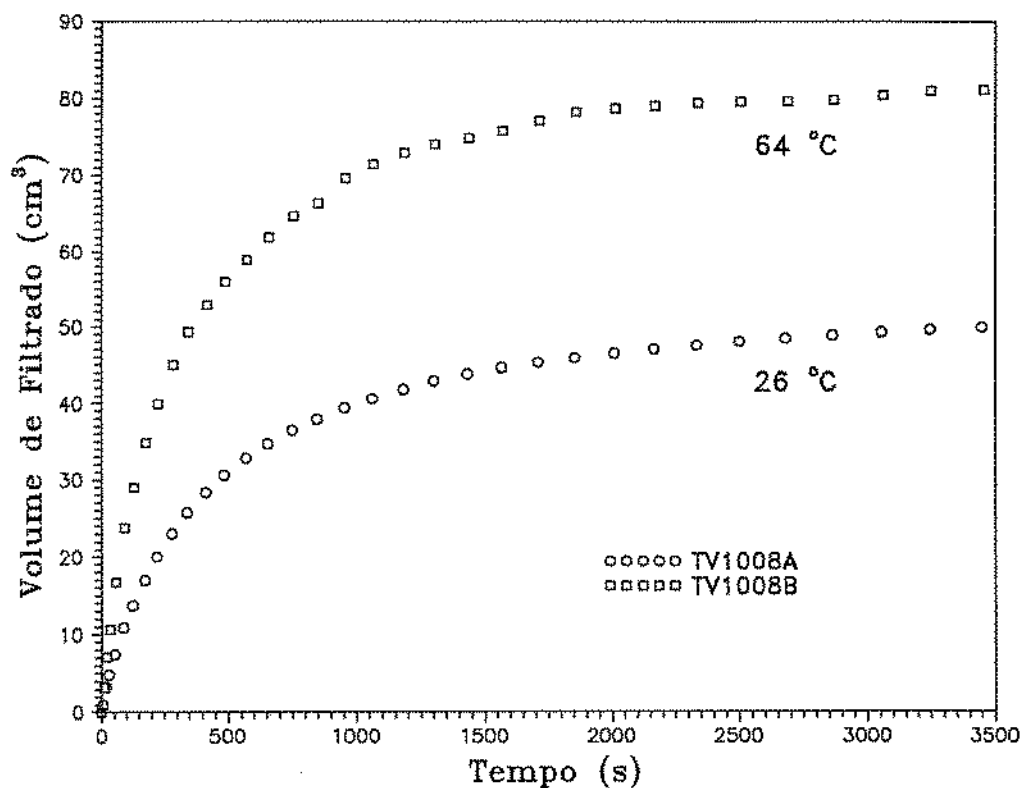


Figura 20: Efeito da temperatura do fluido (HPG  $3,6 \text{ kg/m}^3$ )

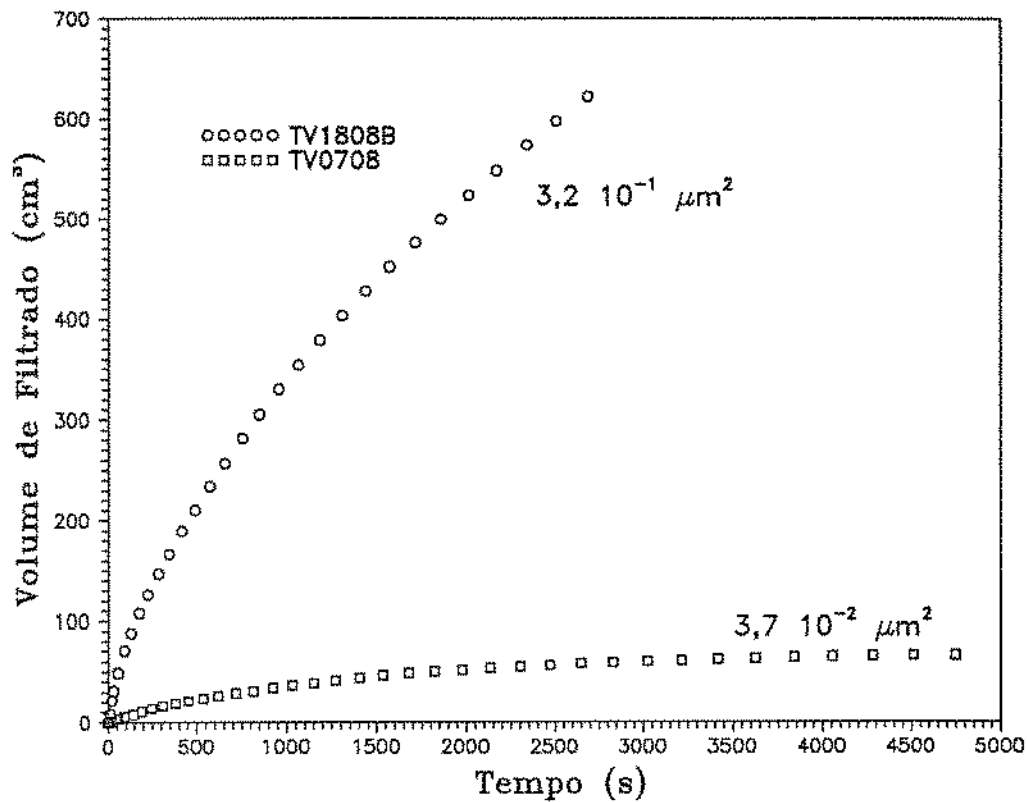


Figura 21: Efeito da permeabilidade do plugue (HPG  $3,6 \text{ kg/m}^3$ )

O reboco formado na face dos plugues apresentou-se de um modo geral uniforme e liso mostrando algum indício de erosão na zona de entrada do fluido, principalmente nos ensaios realizados a uma vazão mais elevada. Foi observada também a formação de um anel em alto relevo nas bordas do reboco, junto ao anel espaçador. O excesso de material acumulado nesta região mostra o efeito da distribuição da velocidade na deposição do reboco. Junto das paredes do canal onde a velocidade é menor, a erosão é menos acentuada, o que determina uma espessura maior para o reboco. No teste feito em condições estáticas, o reboco se apresentou completamente liso, conforme esperado. A diminuição destes efeitos de borda deve ser perseguida para que a transposição dos resultados dos testes para a situação de campo não seja comprometida.

#### 4.1.2 Fluido Viscoso Reticulado

Os ensaios com fluido reticulado (fig. 22 a 29) mostraram que a reticulação do fluido é um mecanismo eficiente para controlar a perda de filtrado. Em comparação com os ensaios realizados em condições semelhantes com o fluido linear, houve uma redução média no volume de filtrado da ordem de 90%. Em relação à taxa de filtração, estes gráficos revelam, ao contrário do que ocorreu com o fluido linear, uma tendência à estabilização, ou seja, uma variação linear do volume de filtrado com o tempo.

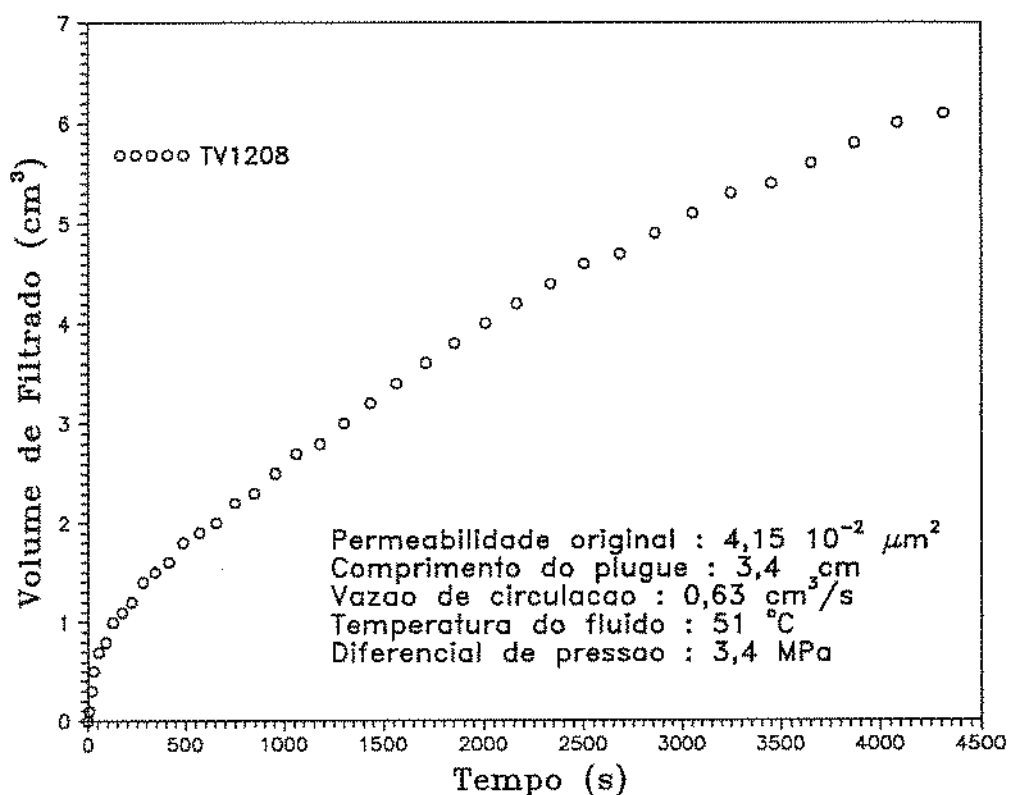


Figura 22: Filtrado acumulado x Tempo (HPG reticulado  $3,6 \text{ kg}/\text{m}^3$ )

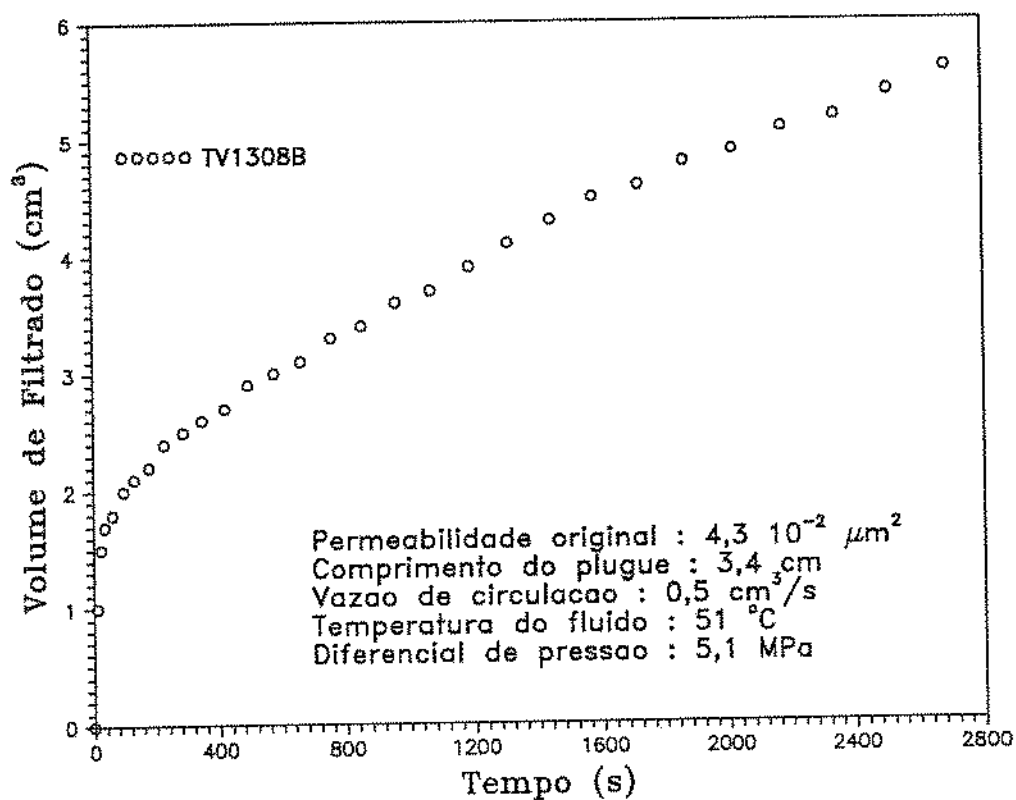


Figura 23: Filtrado acumulado x Tempo (HPG reticulado  $3,6 \text{ kg}/\text{m}^3$ )

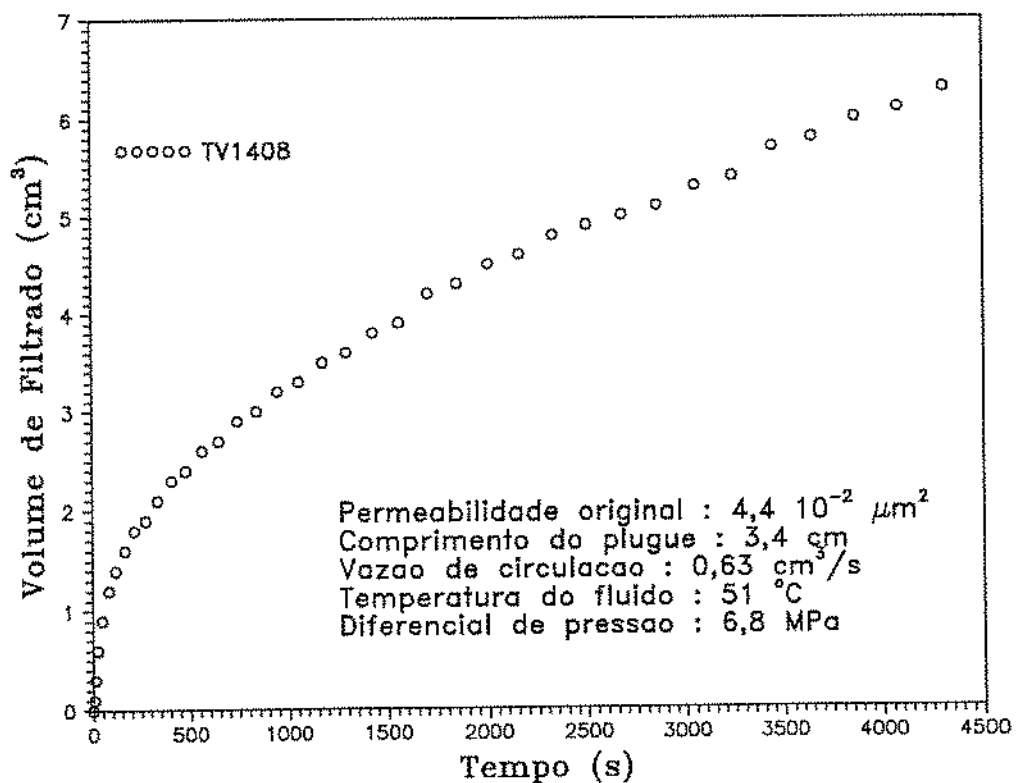


Figura 24: Filtrado acumulado x Tempo (HPG reticulado  $3,6 \text{ kg}/\text{m}^3$ )

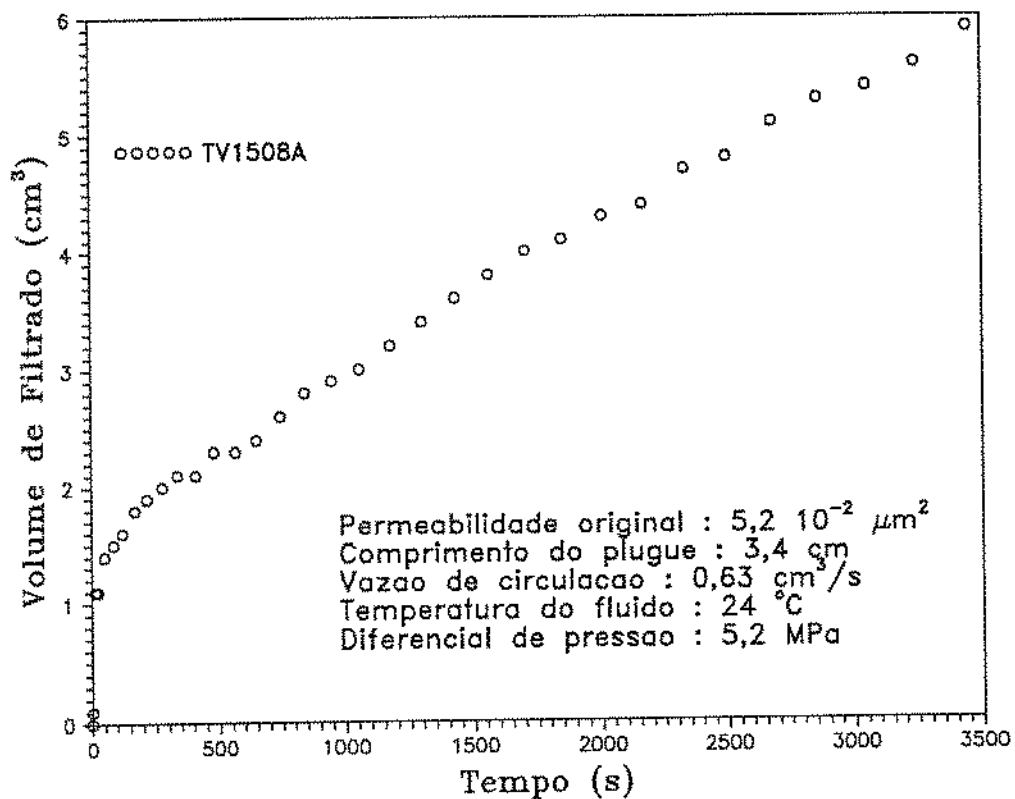


Figura 25: Filtrado acumulado x Tempo (HPG reticulado  $3,6 \text{ kg}/\text{m}^3$ )

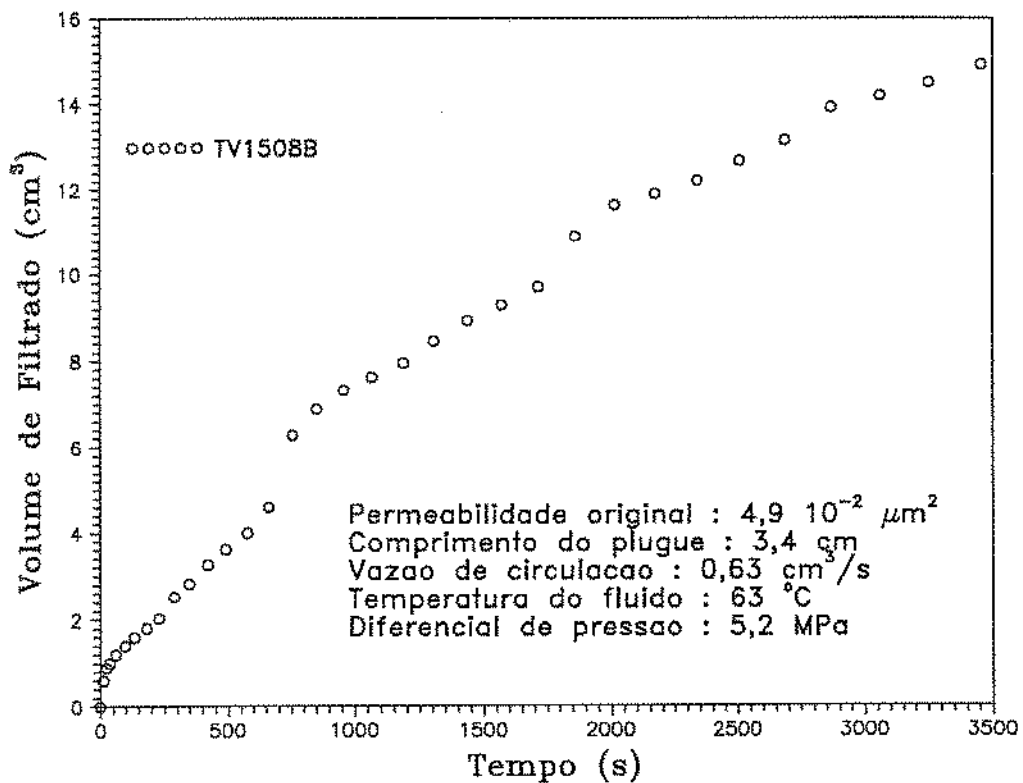


Figura 26: Filtrado acumulado x Tempo (HPG reticulado  $3,6 \text{ kg}/\text{m}^3$ )

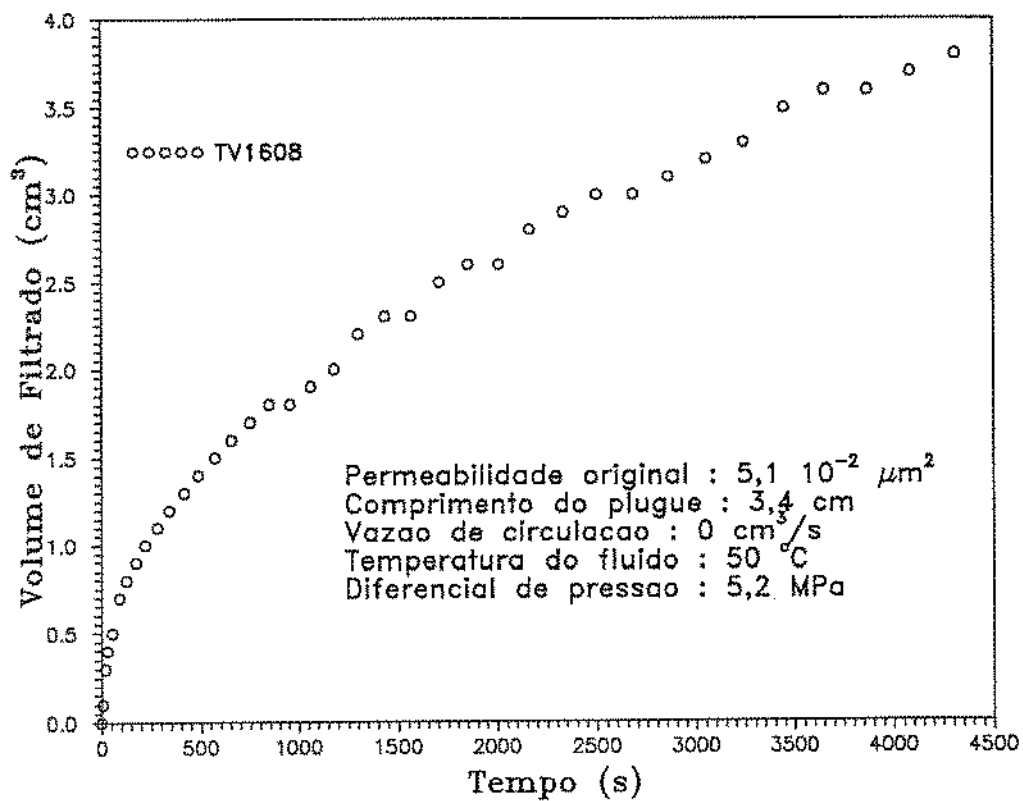


Figura 27: Filtrado acumulado x Tempo (HPG reticulado  $3,6 \text{ kg}/\text{m}^3$ )

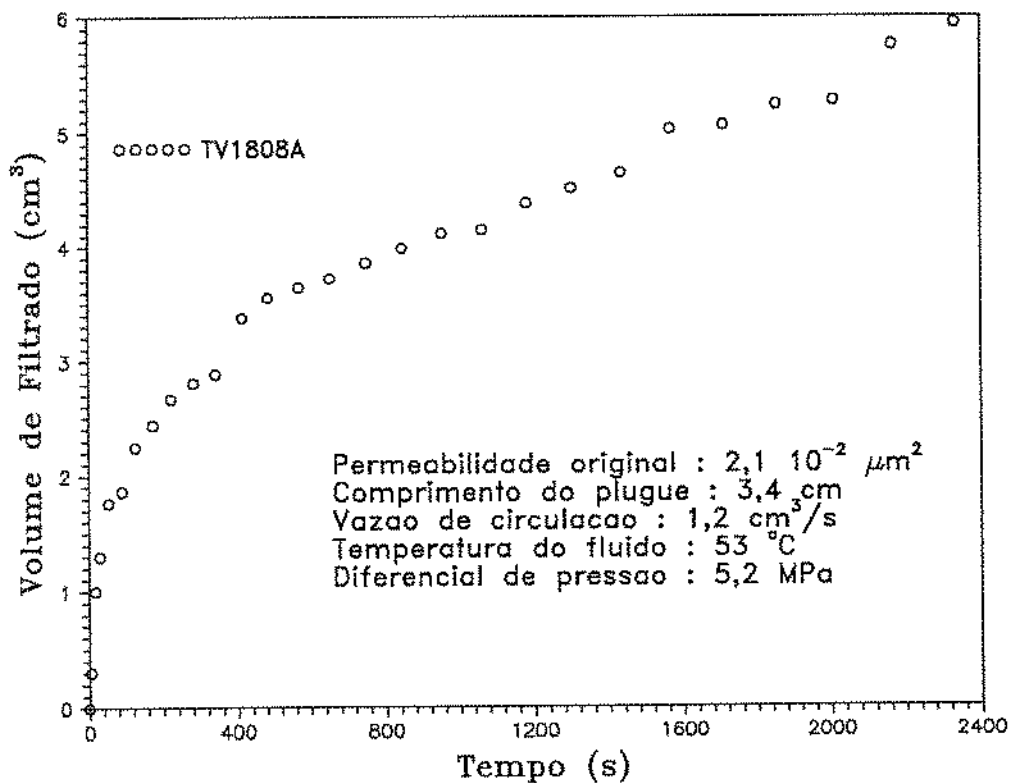


Figura 28: Filtrado acumulado x Tempo (HPG reticulado  $3,6 \text{ kg}/\text{m}^3$ )

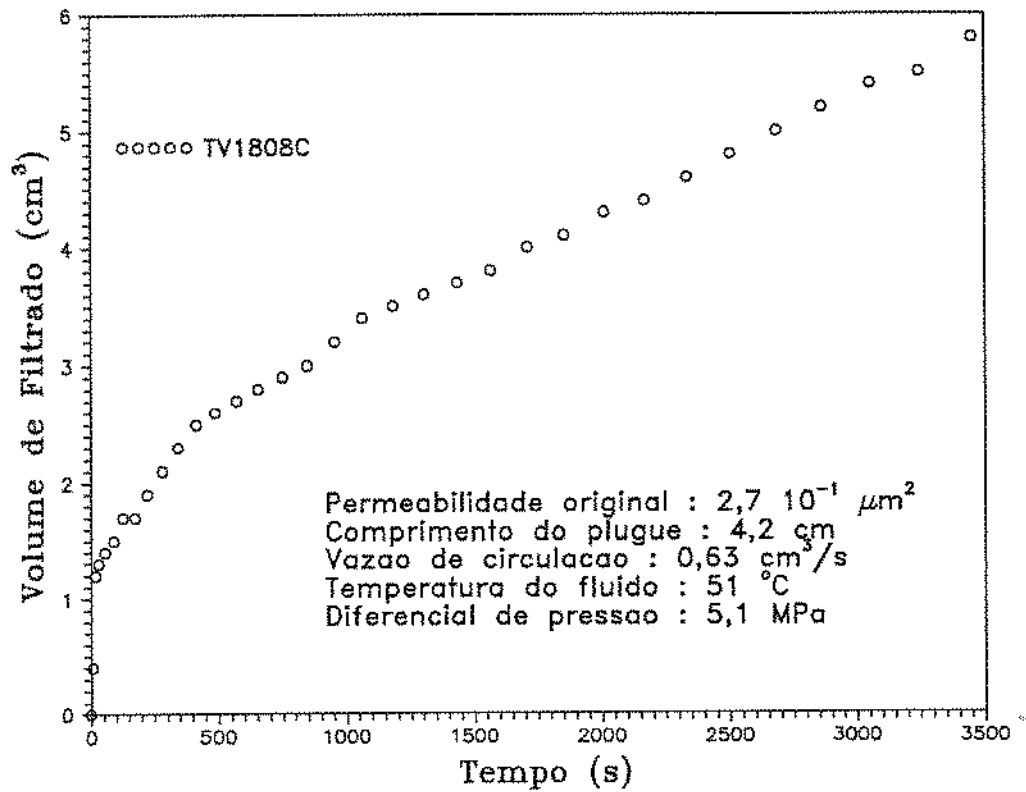


Figura 29: Filtrado acumulado x Tempo (HPG reticulado  $3,6 \text{ kg}/\text{m}^3$ )

O reboco obtido nos ensaios com fluido reticulado, do ponto de vista macroscópico, não difere muito do reboco formado com fluido linear, apesar da quantidade bem menor de filtrado. A espessura final do reboco foi aproximadamente a mesma.

A comparação do desempenho da filtração em relação aos parâmetros, pressão, temperatura e velocidade do escoamento na célula estão apresentadas nas figuras 30 a 32.

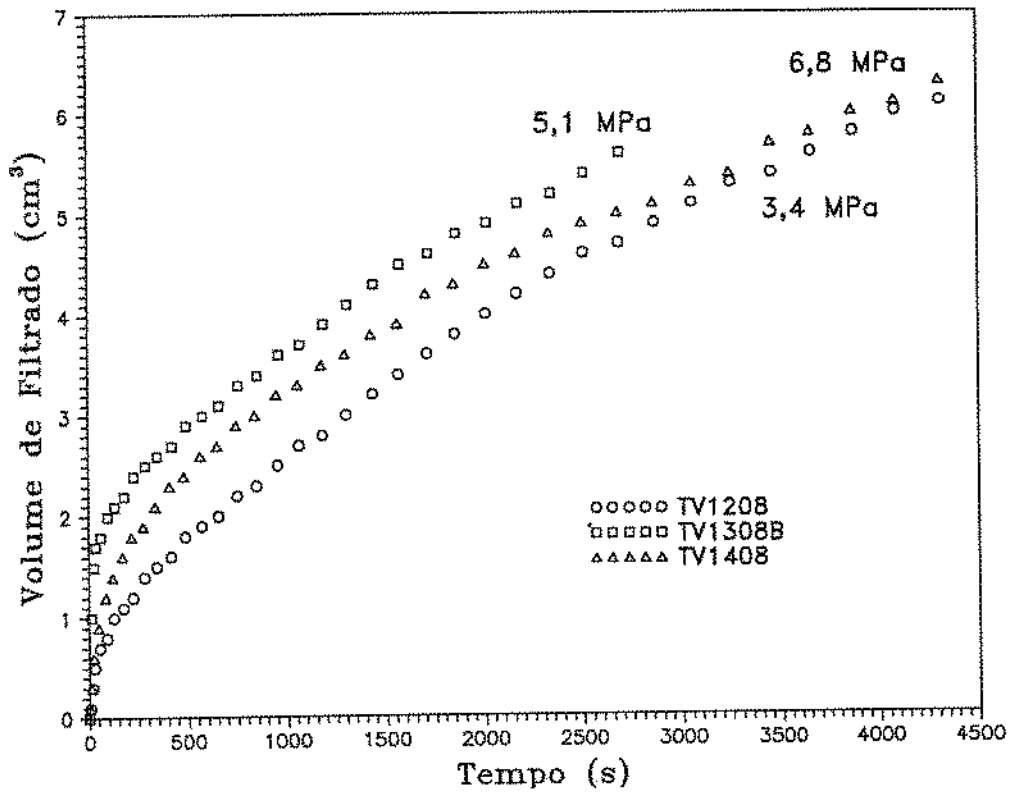


Figura 30: Efeito da pressão (HPG reticulado  $3,6 \text{ kg/m}^3$ )



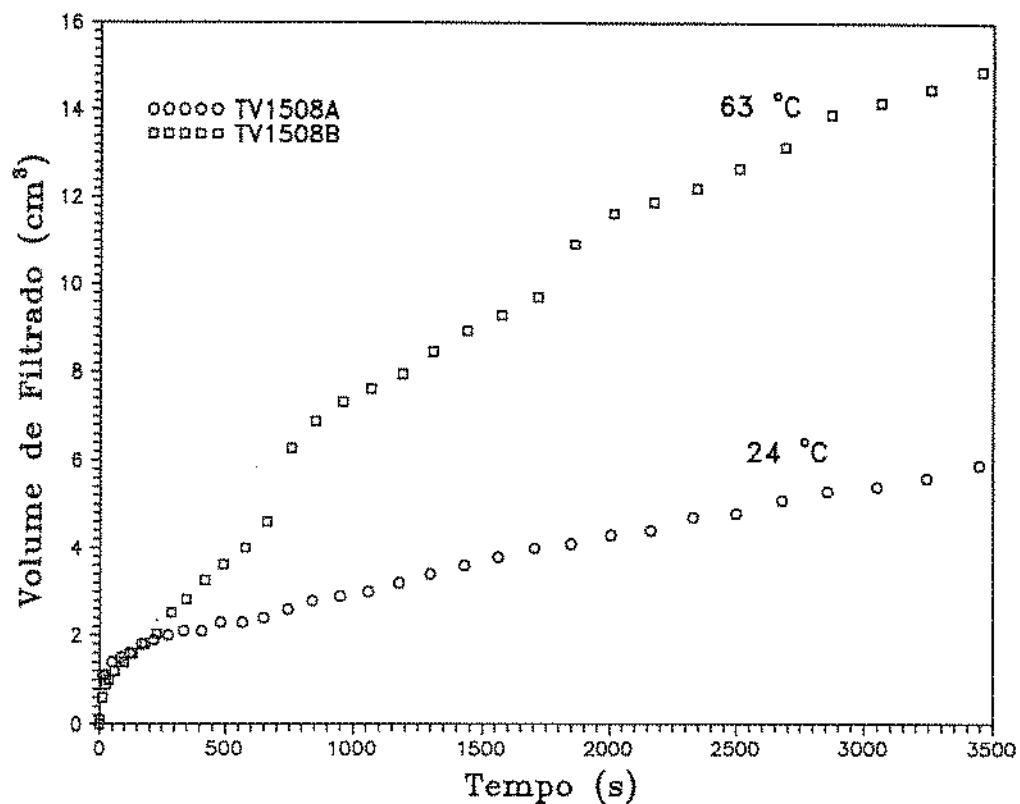


Figura 31: Efeito da temperatura do fluido (HPG reticulado  $3,6 \text{ kg/m}^3$ )

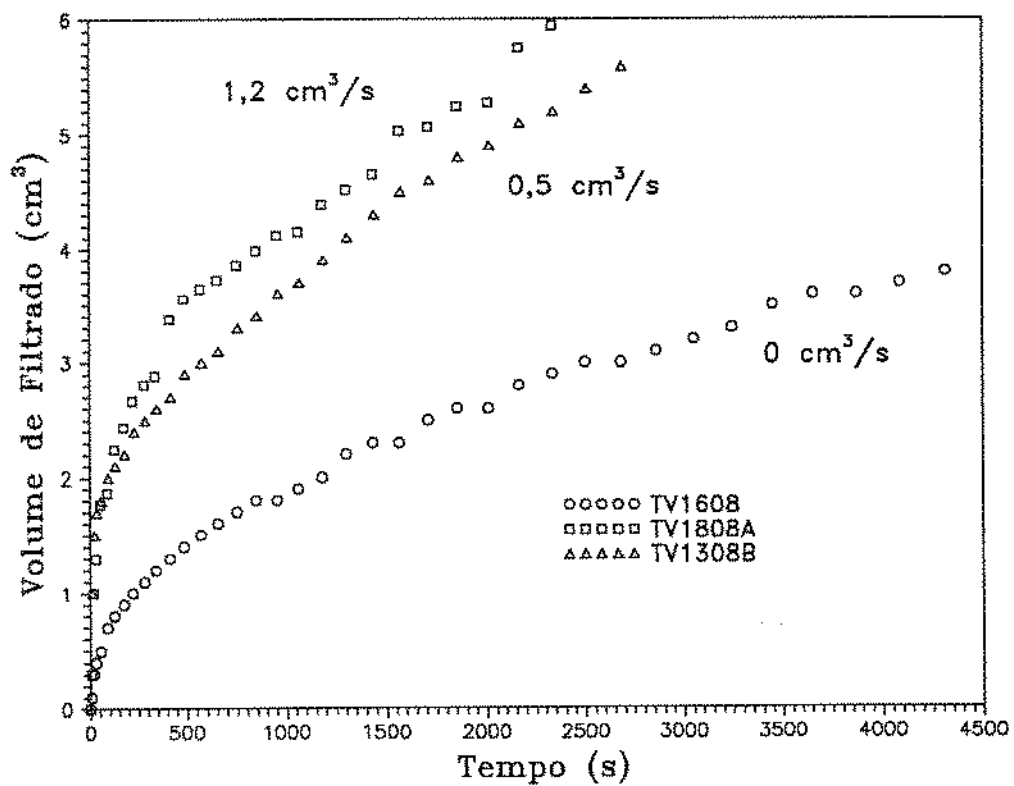


Figura 32: Efeito da vazão de circulação (HPG reticulado  $3,6 \text{ kg/m}^3$ )

A figura 30 mostra um resultado aparentemente diferente daquele esperado. Embora os volumes de filtrado acumulados, tomados novamente aos 2400 s, mostrem um acréscimo de 18% quando a pressão passa de 3,4 MPa para 5,1 MPa, e uma queda de 7,5% quando a pressão passa de 5,1 MPa para 6,8 MPa, estas diferenças resultam de variações na taxa de filtração que ocorreram especialmente na fase inicial da formação do reboco.

No intervalo compreendido entre 300 s e 2400 s, a taxa de filtração é praticamente constante para os três casos. De fato as taxas decresceram 1,2% e 9,2% respectivamente para um aumento de 50 % e 100% na pressão de filtração .

O volume de filtrado (fig. 31) medido aos 2400 s foi 156% maior no ensaio feito à temperatura de fundo, que representa uma variação 2,4 vezes superior àquela obtida com o fluido linear. No intervalo compreendido entre 300 s e 2400 s, a taxa de filtração correspondente ao ensaio realizado à temperatura mais alta foi 3,5 vezes superior àquela tomada à temperatura ambiente.

O impacto da filtração em condição dinâmica é 3,7 vezes maior quando o fluido é linear. Com o fluido reticulado sendo avaliado em condição estática e submetido a um escoamento de  $0,5 \text{ cm}^3/\text{s}$ , a diferença no volume de filtrado (fig. 32) medido aos 2400s foi de 82%, e de 107% quando o escoamento chega a  $1,2 \text{ cm}^3/\text{s}$ . Comparando os ensaios dinâmicos entre si, o efeito do aumento da corrente de fluido faceando o plugue se manifesta na fase inicial da filtração . A variação da taxa de filtração na fase seguinte é de apenas 0,5%.

A variação no volume de filtrado em relação à permeabilidade, para o fluido reticulado (fig. 33), contraria as expectativas geradas no ensaio com fluido linear. Houve uma redução de 11% no volume de filtrado para um aumento de 518% na permeabilidade, enquanto que para o fluido linear o aumento da permeabilidade em 773% correspondeu a uma elevação do volume de filtrado de 970% .

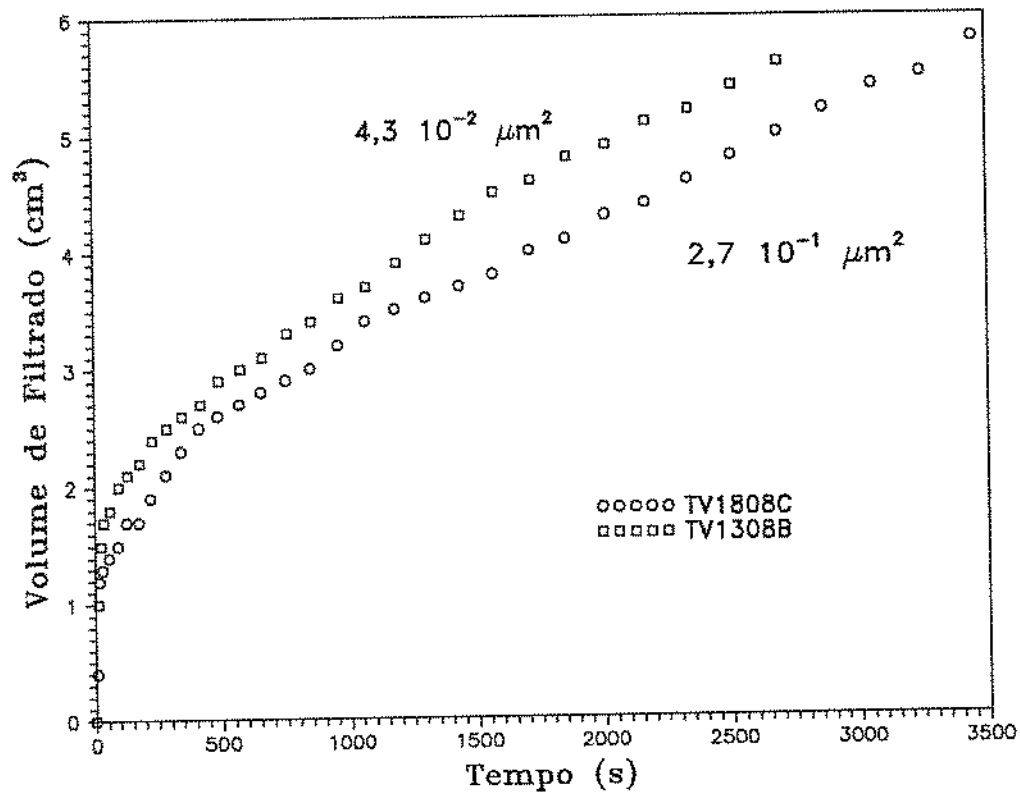


Figura 33: Efeito da permeabilidade do plugue (HPG reticulado  $3,6 \text{ kg/m}^3$ )

## 4.2 Análise dos ensaios de filtração conforme o modelo proposto por McCabe

A teoria clássica da filtração [20] com formação de reboco, fornece a seguinte expressão para a relação entre o tempo e o volume de filtração :

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\mu}{A\Delta P} \left( \frac{\alpha c V}{A} + R_m \right) \quad (15)$$

Esta equação , considerando que  $\Delta P$  e as propriedades do fluido e do reboco não variam com o tempo, fornece uma relação linear entre  $dt/dV$  e  $V$ . Entretanto, os gráficos gerados com os dados dos ensaios de filtração mostram que o trecho inicial da curva  $dt/dV \times V$  , bem como o trecho final, se afastam do comportamento linear. Esta relação linear só tem início após a produção de um determinado volume  $V_1$  de filtrado, correspondendo a um tempo  $t_1$  de filtração .

Para contornar este problema vamos adotar um tempo  $t_1$ , que marca o início do trecho linear, e efetuar a integração da equação 15 a partir deste tempo inicial. Dividindo os dois lados da equação por  $V - V_1$ , a expressão resultante (16) também é linear mas agora as variáveis são o quociente  $(t - t_1)/(V - V_1)$  e  $(V - V_1)$  em lugar de  $dt/dV$  e  $V$ .

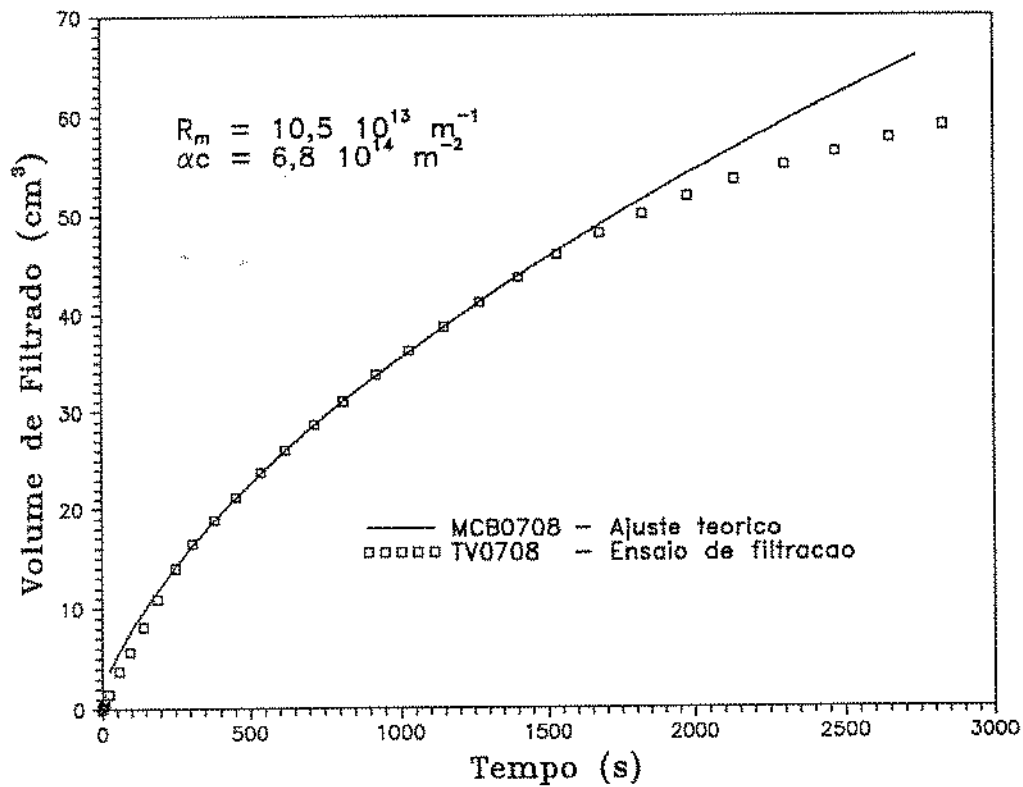
$$\frac{t - t_1}{V - V_1} = \frac{\mu}{A\Delta P} \left[ \frac{\alpha c}{2A} (V - V_1) + R_m \right] \quad (16)$$

Uma vez determinados os coeficientes linear  $C_l$  e angular  $C_a$  desta reta, a resistência à filtração do meio filtrante  $R_m$  e do reboco  $\alpha c$  podem ser calculadas. A tabela 3 mostra os resultados encontrados para  $\alpha c$  e  $R_m$  para cada um dos ensaios.

As figuras 34 a 40 mostram a curva de filtração experimental e a curva dada pela teoria a partir dos resultados apresentados na tabela 3.

Ensaio	$\Delta P$ (MPa)	$\mu$ (Pa.s).10 <sup>-4</sup>	$C_a$ (s/cm <sup>6</sup> )	$C_l$ (s/cm <sup>3</sup> )	$R_m$ (m <sup>-1</sup> ).10 <sup>13</sup>	$\alpha c$ (m <sup>-2</sup> ).10 <sup>14</sup>
0708	5,1	5,5	0,4220	38,46	10,5	6,83
0808	6,4	5,4	0,3680	17,32	6,12	7,68
0908A	5,1	6,4	0,2477	16,83	4,01	3,49
0908B	5,2	6,3	0,4187	6,486	1,58	6,03
0908C	5,2	6,2	2,6517	9,417	2,33	38,7
1008A	5,2	8,9	0,3222	11,79	2,03	3,27
1008B	5,2	4,6	0,1409	7,520	2,53	2,80

Tabela 3: Análise de McCabe - Fluido Linear

Figura 34: Ajuste dos dados experimentais conforme McCabe (HPG 3,6 kg/m<sup>3</sup>)

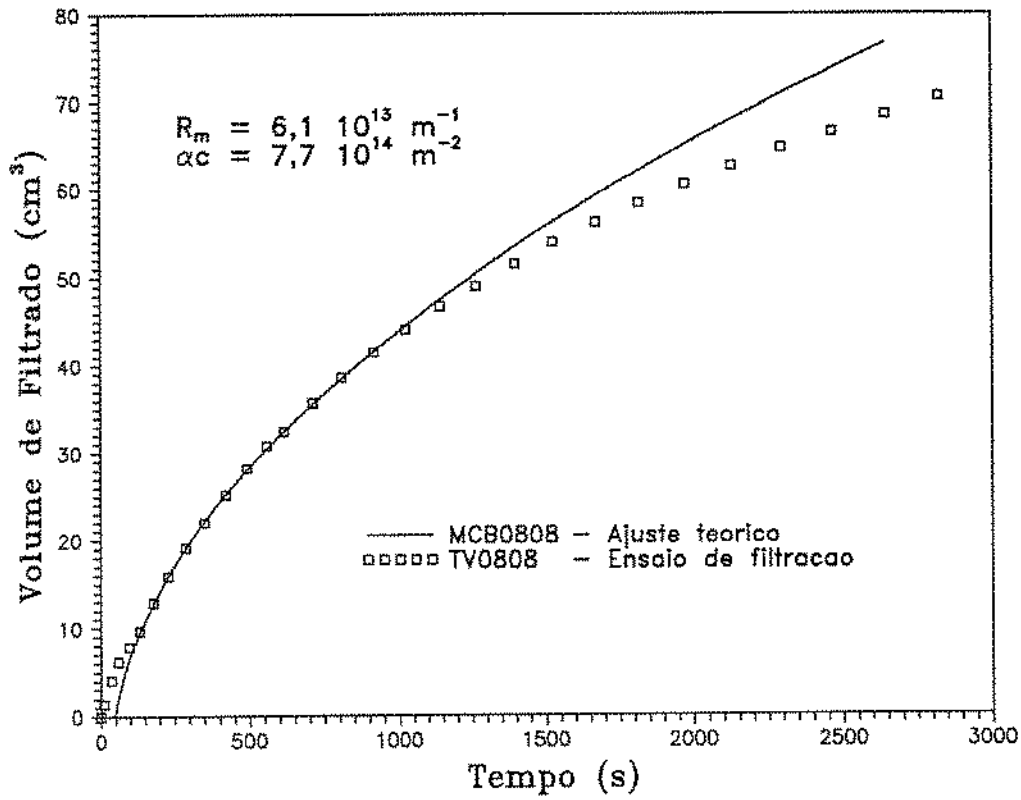


Figura 35: Ajuste dos dados experimentais conforme McCabe (HPG 3,6 kg/m<sup>3</sup>)

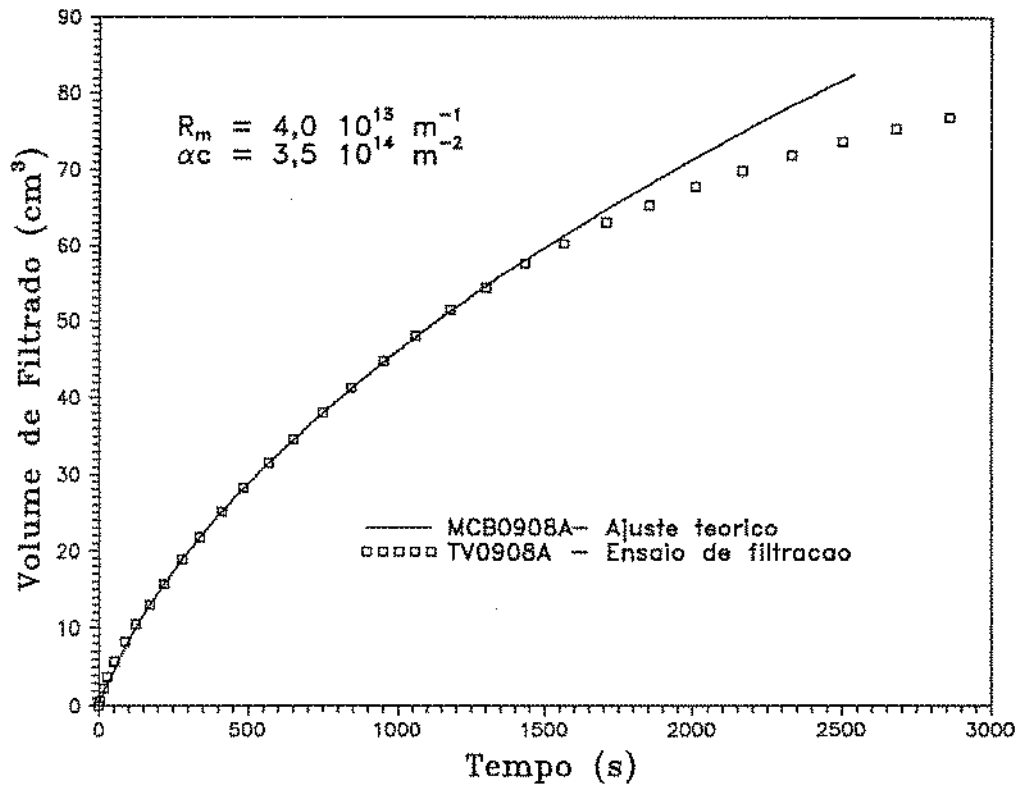


Figura 36: Ajuste dos dados experimentais conforme McCabe (HPG 3,6 kg/m<sup>3</sup>)

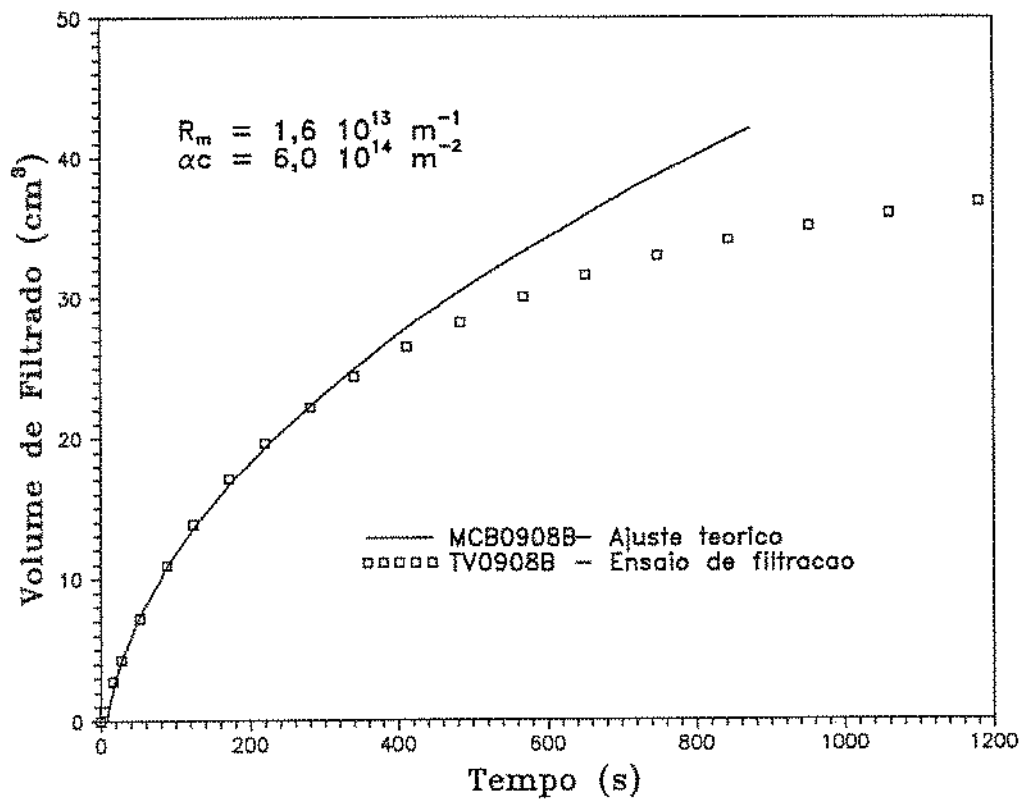


Figura 37: Ajuste dos dados experimentais conforme McCabe (HPG  $3,6 \text{ kg/m}^3$ )

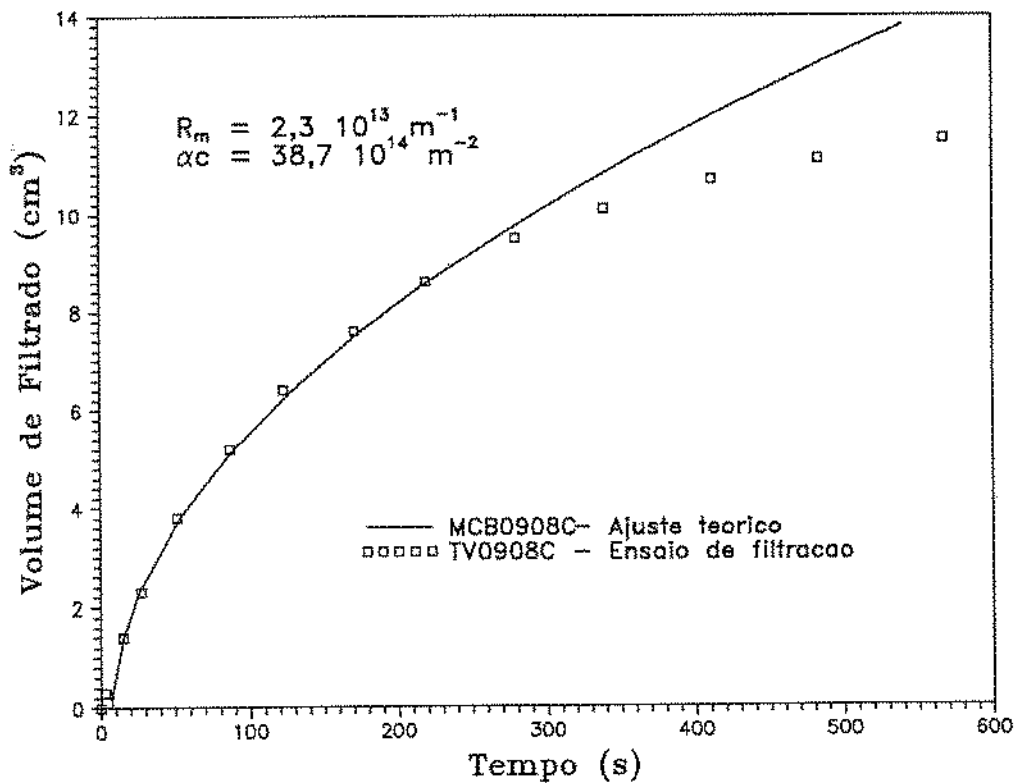


Figura 38: Ajuste dos dados experimentais conforme McCabe (HPG  $3,6 \text{ kg/m}^3$ )

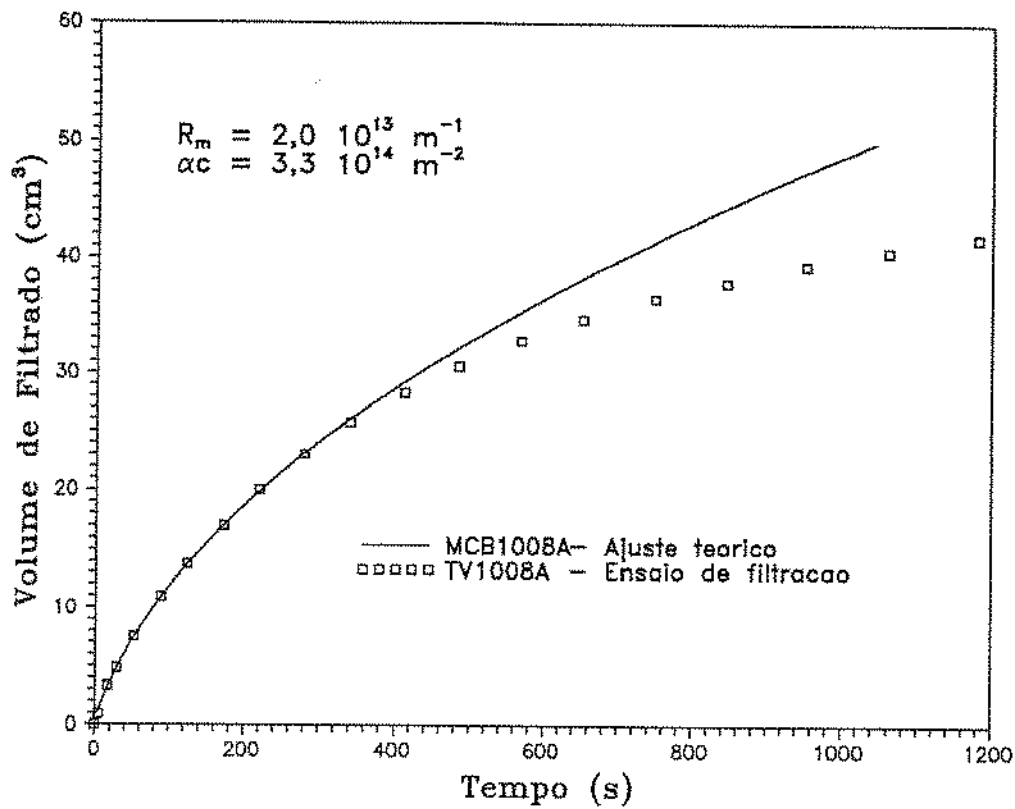


Figura 39: Ajuste dos dados experimentais conforme McCabe (HPG  $3,6 \text{ kg/m}^3$ )

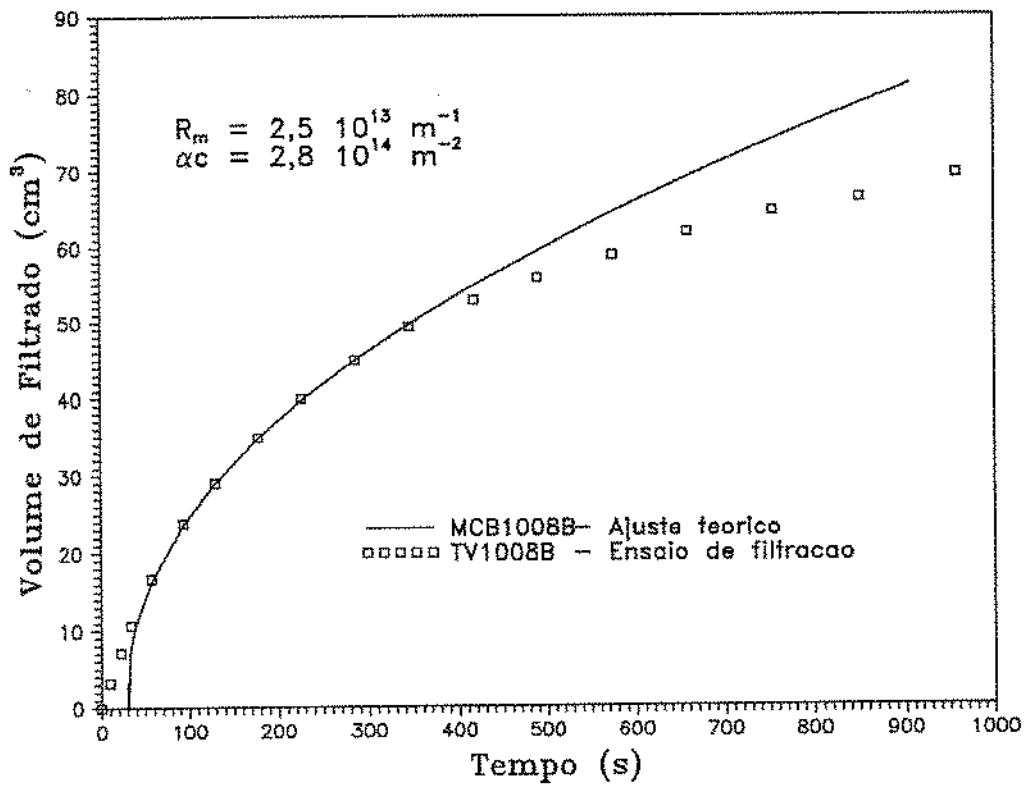


Figura 40: Ajuste dos dados experimentais conforme McCabe (HPG  $3,6 \text{ kg/m}^3$ )



As curvas teóricas representam a filtração na sua parte intermediária. Algumas discrepâncias são notadas no início, para  $t \leq t_1$ , e no final.

Um dos motivos para o afastamento inicial é a demora para que o reboco atinja o tamanho necessário para que suas propriedades macroscópicas se manifestem [17].

Na fase final, a taxa de filtração menor que a prevista no modelo reflete uma mudança nas propriedades do reboco e do filtro em relação à fase anterior. A razão para que isto ocorra neste equipamento e nas condições de escoamento impostas, pode ser atribuída a um processo de migração e deposição de partículas muito finas, fazendo com que a resistência  $\alpha c$  e  $R_m$  aumentem no decorrer do experimento [23].

Na figura 41 podemos observar o comportamento de  $\alpha c$  em relação pressão.

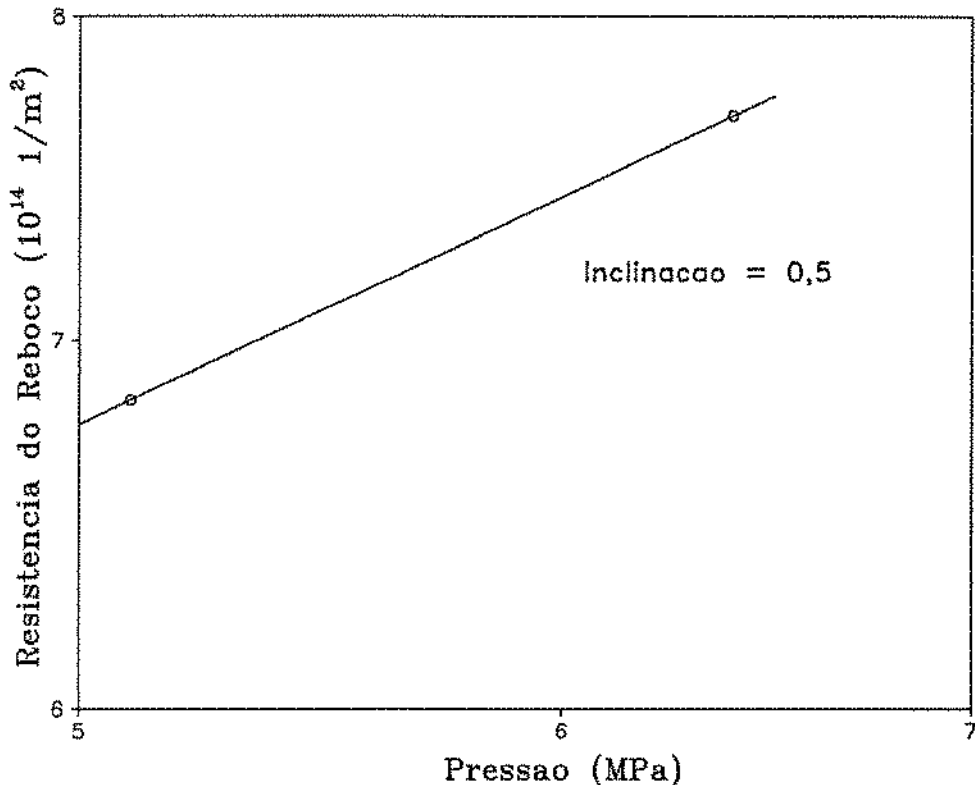


Figura 41: Pressão x Resistência do reboco

A análise do gráfico 41 mostra que  $\alpha c$  é proporcional à  $\sqrt{\Delta P}$  e portanto o reboco deve ser considerado compressível.

Um exame na tabela 3 mostra que a passagem da condição estática para uma condição dinâmica de escoamento é responsável pela maior variação (1000%) no valor de  $\alpha c$ . Como esperado o efeito da temperatura foi reduzido (14%) já que este parâmetro não depende da viscosidade do filtrado.

Em relação à resistência do meio poroso  $R_m$ , os valores apresentados na tabela 3 se referem ao instante  $t_1$ , que marca o início da formação do reboco. Estes valores são até 100 vezes maiores que aqueles calculados com base na permeabilidade original do plugue, evidenciando uma fase de invasão de partículas no meio poroso.

### 4.3 Análise dos ensaios de filtração conforme o modelo proposto por Poulsen

A análise que faremos dos dados de filtração inicialmente, considera que a filtração está dividida em duas etapas. A primeira fase se caracteriza pela inexistência de reboco. Neste caso o volume de filtrado <sup>3</sup> é dado pela expressão abaixo

$$V = \frac{\Delta P}{R_v} t \quad (17)$$

Na segunda fase, a filtração passa a ser influenciada também pelo crescimento do reboco na face do plugue. A expressão que define a relação entre o volume de filtrado e o tempo é a seguinte

$$V = V_s + 2\alpha_w^2 \left( -R_v + \sqrt{R_v^2 + \frac{\Delta P (t - t_s)}{\alpha_w^2}} \right) \quad (18)$$

O tempo  $t_s$  e o volume  $V_s$  se referem ao momento em que ocorre a mudança de fase, isto é, tem início a formação do reboco.

---

<sup>3</sup>No modelo de Poulsen  $V$  representa o volume de filtrado por unidade de área.

A análise desta última expressão quando o tempo de filtração é muito grande, nos revela uma relação linear entre o volume de filtrado e a raiz do tempo, dada pela expressão abaixo

$$V = (V_s - 2\alpha_w^2 R_v) + 2\alpha_w \sqrt{\Delta P} \sqrt{t} \quad (19)$$

Devemos observar que  $\alpha_w$  é obtido a partir do coeficiente angular desta reta. Conhecendo ainda o seu coeficiente linear e determinando a resistência do meio filtrante através da equação que rege o início da filtração, chegamos ao valor de  $V_s$ .

Este procedimento pode ser estendido para os casos em que o fluido tem suas características alteradas após já haver se formado um reboco. O reboco que se forma a partir de então possui propriedades distintas e um novo coeficiente  $\alpha_{w1}$  deve ser determinado.

A expressão que define a relação entre o volume de filtrado e o tempo para esta nova fase passa a ser a seguinte

$$V = V_1 + 2\alpha_{w1}^2 \left( - \left( \frac{V_1}{4\alpha_w^2} + R_v \right) + \sqrt{\left( \frac{V_1}{4\alpha_w^2} + R_v \right)^2 + \frac{\Delta P (t - t_1)}{\alpha_{w1}^2}} \right) \quad (20)$$

O tempo  $t_1$  e o volume  $V_1$  marcam o início da nova fase.

Como anteriormente, vamos utilizar o comportamento de longo tempo para calcular  $\alpha_{w1}$ ,  $V_1$ . Para  $t \gg t_1$ , temos

$$V = \left( V_1 \left( 1 - \frac{\alpha_{w1}^2}{2\alpha_w^2} \right) - 2\alpha_{w1}^2 R_v \right) + 2\alpha_{w1} \sqrt{\Delta P} \sqrt{t} \quad (21)$$

$\alpha_{w1}$  é dado diretamente pelo coeficiente angular  $C_{a1}$  desta reta, enquanto  $V_1$  pode ser obtido a partir do valor do coeficiente linear  $C_{l1}$  e das grandezas calculadas anteriormente.

### 4.3.1 Fluido Viscoso não Reticulado

Na aplicação do modelo de Poulsen aos dados dos ensaios realizados com o fluido não reticulado, a filtração foi dividida em três fases distintas. As duas primeiras fases correspondem ao início da filtração e à formação do reboco. A última está associada a uma redução incomum na taxa de filtração que marcou o final dos ensaios.

A tabela 4 apresenta os parâmetros referentes às duas fases iniciais da filtração

Ensaio	$\Delta P$ (MPa)	$C_a (V \times t^{1/2})$ (cm <sup>3</sup> /s <sup>0,5</sup> )	$C_l (V \times t^{1/2})$ (cm <sup>3</sup> )	$C_a (V \times t)$ (cm <sup>3</sup> /s)	$R_v$ (Pa.s/m).10 <sup>10</sup>	$\alpha_w$ (m/(Pa.s) <sup>0,5</sup> ).10 <sup>-6</sup>	$V_s$ (cm <sup>3</sup> )
0708	5,1	1,37	-8,02	0,0607	2,47	1,03	7,5
0808	6,4	1,66	-8,96	0,104	1,82	1,11	4,3
0908A	5,1	1,84	-12,0	0,136	1,11	1,37	3,7
0908B	5,2	1,55	-3,71	0,174	0,88	1,15	3,2
0908C	5,2	0,603	-0,403	0,0849	1,80	0,45	1,7
1008A	5,2	1,56	-3,56	0,196	0,77	1,16	2,6
1008B	5,2	2,96	-5,07	0,316	0,48	2,20	8,8
1808B	5,2	13,9	-98,4	0,974	0,16	10,34	0,79

Tabela 4: Análise de Poulsen - Fluido Linear

Quando o parâmetro  $\alpha_w$ , dado pela expressão

$$\alpha_w = \sqrt{\frac{k_w}{\mu\nu}} \quad (22)$$

não varia com a pressão, o reboco é incompressível e deste modo a taxa de filtração é proporcional à  $\sqrt{\Delta P}$ .

No caso de reboco compressível, o aumento da pressão provoca uma elevação da vazão de filtrado e conseqüentemente uma redução da permeabilidade do reboco. Deste

modo, a variação observada de 7% no valor de  $\alpha_w$  correspondente a um aumento da pressão de 5,1 para 6,4 MPa não pode ser associada diretamente a um aumento da permeabilidade do reboco, mas a um conjunto de fatores não controlados que afetaram a filtração de modo diferente do previsto no modelo.

Em relação à análise anterior pelo modelo de McCabe, quando o reboco foi considerado compressível, o resultado é explicado pelo fato de que os parâmetros são obtidos através de um método distinto e não se referem exatamente à mesma fase do ensaio.

A figura 42 mostra uma variação linear de  $\alpha_w$  com a raiz quadrada da vazão de circulação  $Q$ . Então, de acordo com o modelo,  $\nu$ , a taxa de crescimento do reboco por unidade de volume de filtrado é inversamente proporcional à vazão, fruto do processo de erosão do reboco, que ocorre em função da condição dinâmica de filtração .

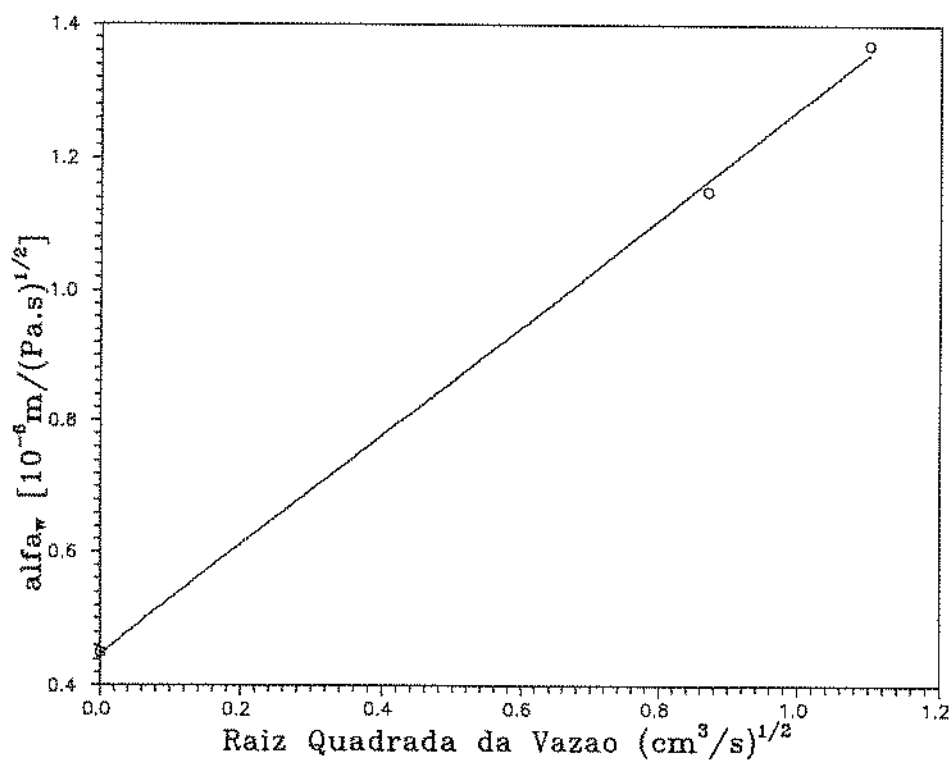


Figura 42: Vazão de circulação x  $\alpha_w$

Em relação à temperatura, o aumento de  $\alpha_w$  supera a previsão feita com

base na variação da viscosidade do filtrado, assumindo que o filtrado tem comportamento semelhante ao da água. O valor de  $\alpha_w$  aumentou 90% mas a parcela que é devida à variação da viscosidade do filtrado é de apenas 39%. Os 51% restantes devem ser atribuídos a alterações nas propriedades do reboco.

O resultado do ensaio realizado com plugue de permeabilidade mais elevada mostrou a importância deste fator no processo de formação do reboco. O parâmetro  $\alpha_w$  sofreu um aumento de 900% correspondente a um aumento na permeabilidade do plugue de 773%. Se esse resultado dependesse apenas da permeabilidade do reboco, esta seria proporcional ao quadrado da permeabilidade do plugue. No entanto, foi observado no ensaio que a viscosidade do filtrado e a taxa de crescimento do reboco também foram influenciadas.

Deste modo, tanto o aumento da permeabilidade do reboco, formado apenas pelos sólidos mais grosseiros, como a redução da sua taxa de crescimento contribuíram para o aumento de  $\alpha_w$ , enquanto que o aumento da viscosidade do filtrado agiu em sentido contrário. Para conferir se existe um valor crítico de permeabilidade do plugue, abaixo do qual não há mudança importante no valor de  $\alpha_w$ , serão necessários mais testes com plugues de permeabilidades intermediárias.

A resistência à filtração na fase que antecede a formação de reboco é dada pela expressão

$$R_v = \frac{\mu L}{k_v} \quad (23)$$

Os valores de  $R_v$  apresentados na tabela 4 correspondem a permeabilidades 15 até 50 vezes inferiores às permeabilidades originais dos plugues, considerando o plugue saturado com fluido de mesma viscosidade do filtrado <sup>4</sup>. Este resultado revela um processo de invasão do meio poroso por sólidos no início da filtração. O valor de  $R_v$  é portanto

---

<sup>4</sup>Não vale para o ensaio realizado com o plugue de permeabilidade mais elevada.

o valor médio para o período. O volume de filtrado  $V_2$  produzido nesta fase variou entre 7,4% e 21% do volume total acumulado ao final da segunda fase. Não foi observada nenhuma outra tendência específica.

De acordo com o modelo [17], uma vez atingido o trecho linear no gráfico  $V \times \sqrt{t}$ , este comportamento se mantém até que as propriedades do fluido sejam modificadas. Embora nos ensaios realizados o fluido tivesse permanecido o mesmo, o desvio do comportamento linear a partir de um dado momento <sup>5</sup> indica uma mudança no padrão de formação do reboco ou uma variação na resistência à filtração correspondente ao plugue e o reboco existente. Com o intuito de representar o ensaio em todas as suas fases, foi admitida a primeira hipótese, já que a segunda não está contemplada no modelo.

Na tabela 5 temos o resultado da aplicação do modelo, considerando uma mudança de  $\alpha_w$  no decorrer da filtração. Neste caso o valor de  $\alpha_{w1}$  representa o trecho final da curva de filtração.

Ensaio	$\Delta P$ (MPa)	$C_{a1}$ ( $V \times t^{1/2}$ ) ( $cm^3/s^{0,5}$ )	$C_{l1}$ ( $V \times t^{1/2}$ ) ( $cm^3$ )	$R_{v1}$ (Pa.s/m). $10^{10}$	$\alpha_{w1}$ ( $m/(Pa.s)^{0,5}$ ). $10^{-7}$	$V_1$ ( $cm^3$ )
0708	5,1	0,229	50,1	6,55	1,72	51,3
0808	6,4	1,17	8,80	3,22	7,78	20,3
0908A	5,1	0,518	50,3	3,51	3,87	53,5
0908B	5,2	0,173	32,1	2,95	1,28	32,4
0908C	5,2	0,0859	10,0	6,08	0,639	10,2
1008A	5,2	0,270	34,4	2,98	2,01	35,1
1008B	5,2	0,295	64,5	1,62	2,19	64,9

Tabela 5: Análise de Poulsen aplicada ao trecho final do ensaio - Fluido Linear

Uma análise das tabelas 4 e 5 revela que o valor de  $\alpha_{w1}$ , que caracteriza o reboco formado na parte final do ensaio, é em média 77% menor que o coeficiente  $\alpha_w$  do

<sup>5</sup>No ensaio realizado com plugue de permeabilidade mais alta não foi atingida esta fase.

reboco formado inicialmente. A menor redução foi de 30% e ocorreu no ensaio realizado a pressão mais elevada. As reduções observadas nos demais foram superiores a 60%. O volume de filtrado produzido nesta última fase corresponde em média a 33% do volume acumulado aos 2400 s.

A resistência ao final da segunda fase de filtração,  $R_{v,1}$ , é a soma da resistência devida ao plugue,  $R_v$ , com o termo  $\frac{V_1}{4\alpha_w}$ . O seu valor é em média 2,9 vezes maior que o de  $R_v$ .

As figuras 43 a 49 mostram as curvas teóricas  $V \times \sqrt{t}$  calculadas com os parâmetros das tabelas 4 e 5 comparadas com aquelas obtidas diretamente dos ensaios.

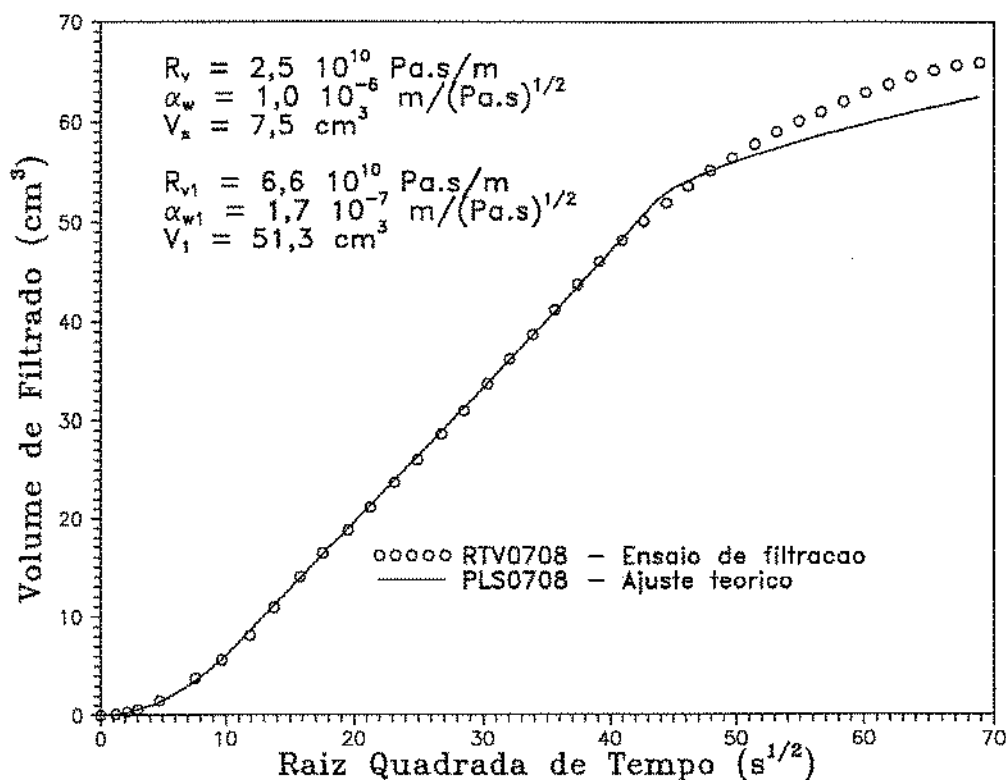


Figura 43: Ajuste dos dados experimentais conforme Poulsen (HPG 3,6 kg/m<sup>3</sup>)



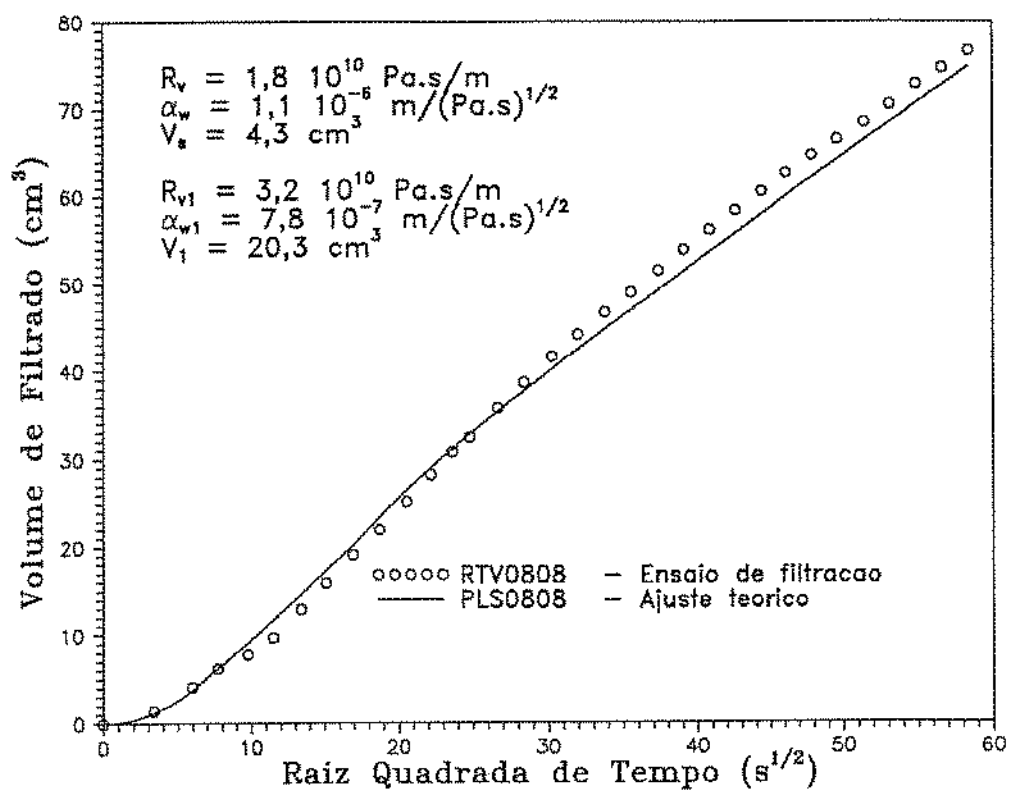


Figura 44: Ajuste dos dados experimentais conforme Poulsen (HPG  $3,6 \text{ kg/m}^3$ )

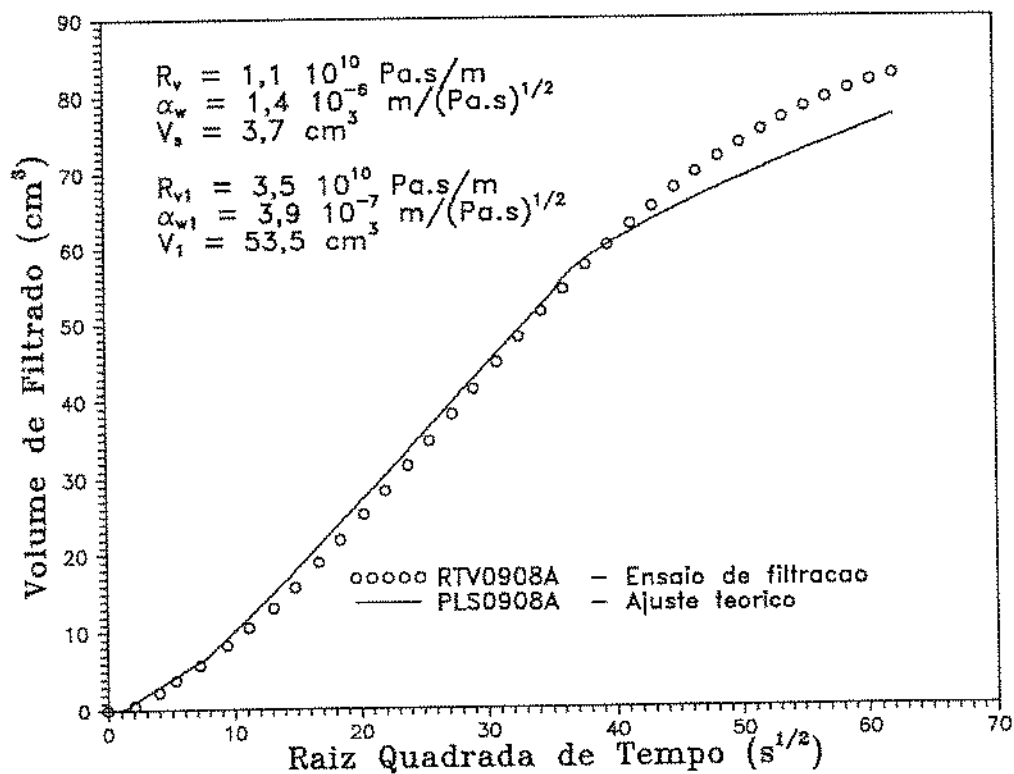


Figura 45: Ajuste dos dados experimentais conforme Poulsen (HPG  $3,6 \text{ kg/m}^3$ )

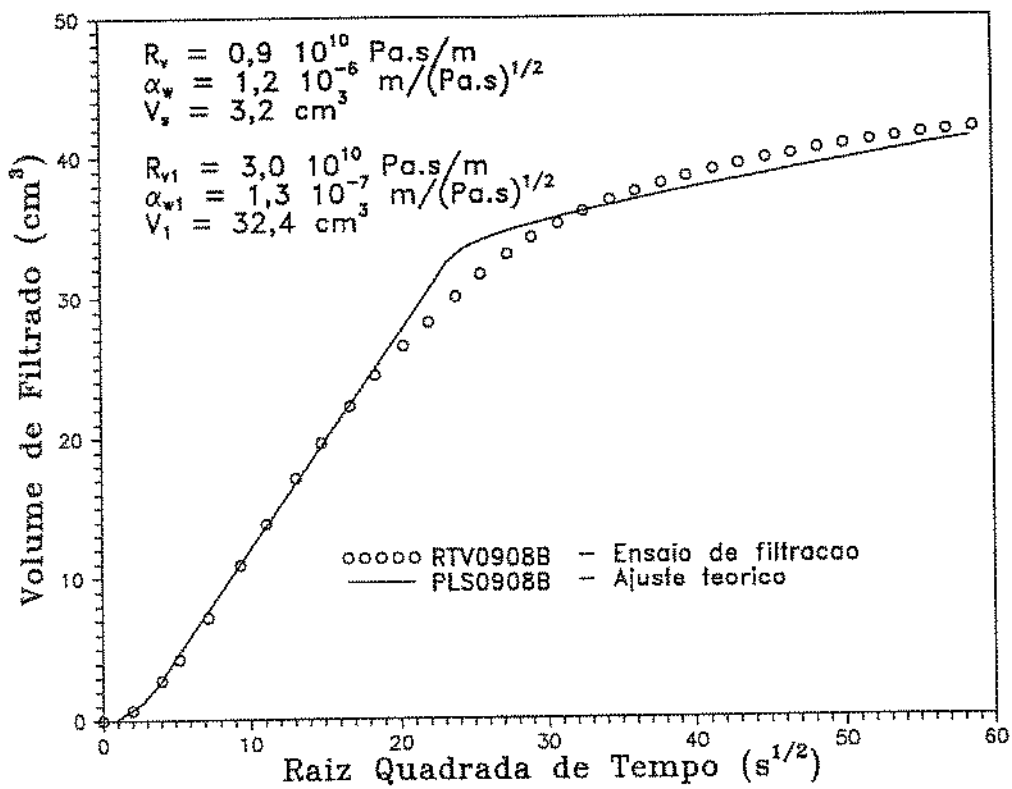


Figura 46: Ajuste dos dados experimentais conforme Poulsen (HPG  $3,6 \text{ kg/m}^3$ )

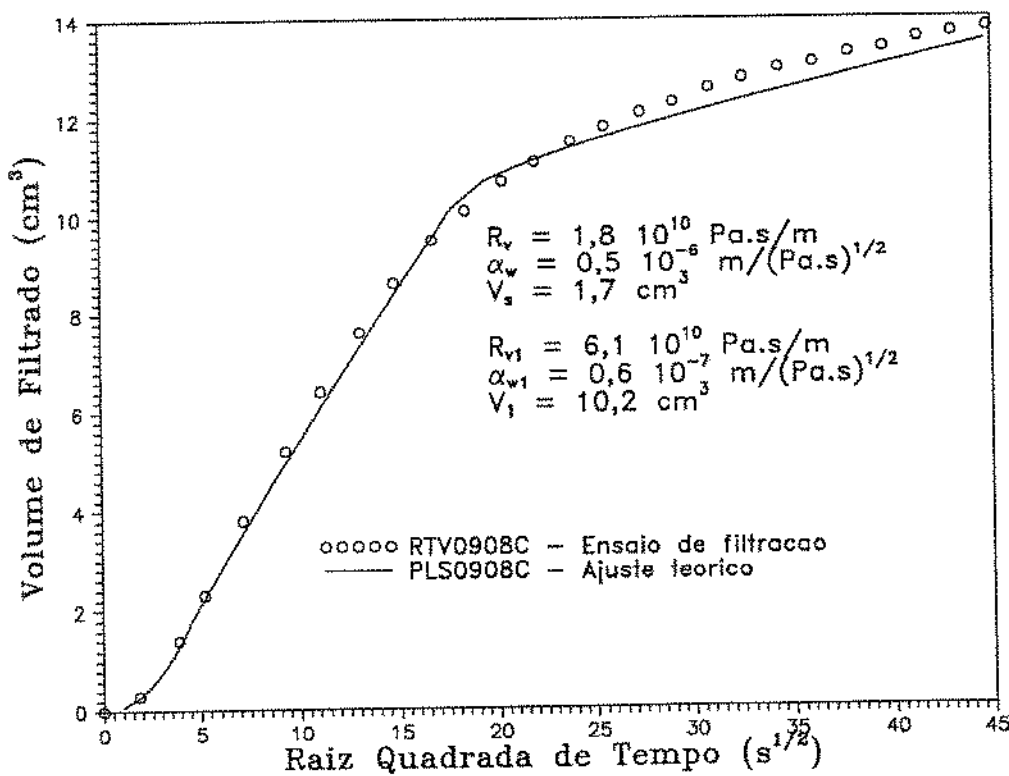


Figura 47: Ajuste dos dados experimentais conforme Poulsen (HPG  $3,6 \text{ kg/m}^3$ )

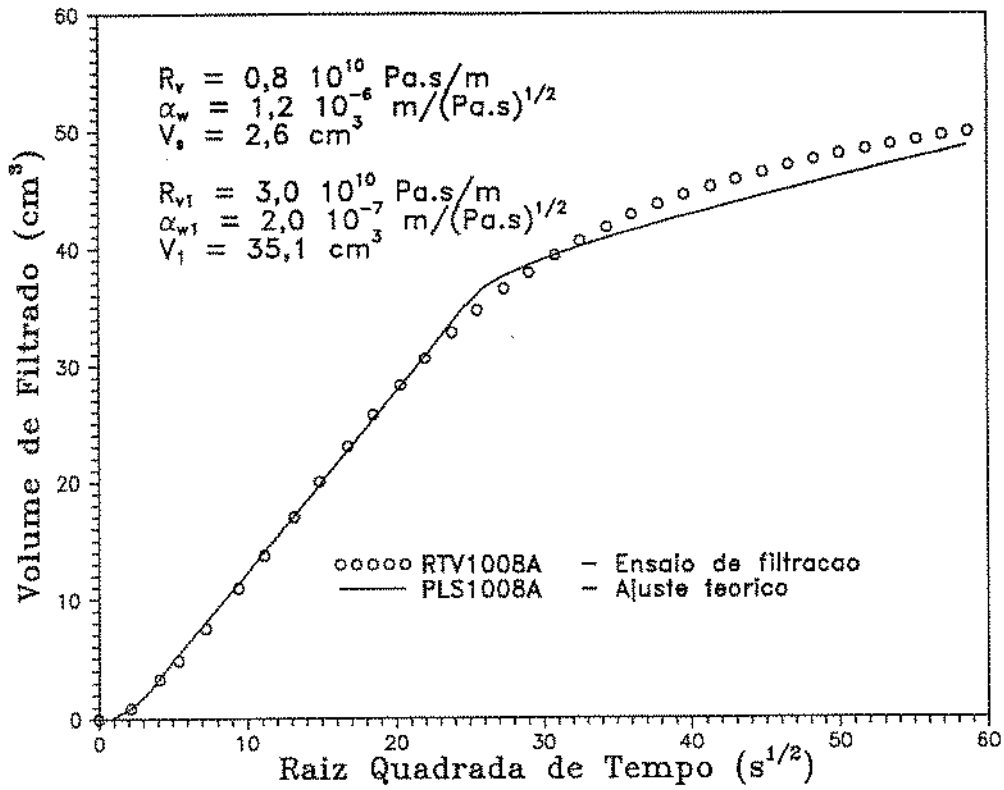


Figura 48: Ajuste dos dados experimentais conforme Poulsen (HPG  $3,6 \text{ kg}/\text{m}^3$ )

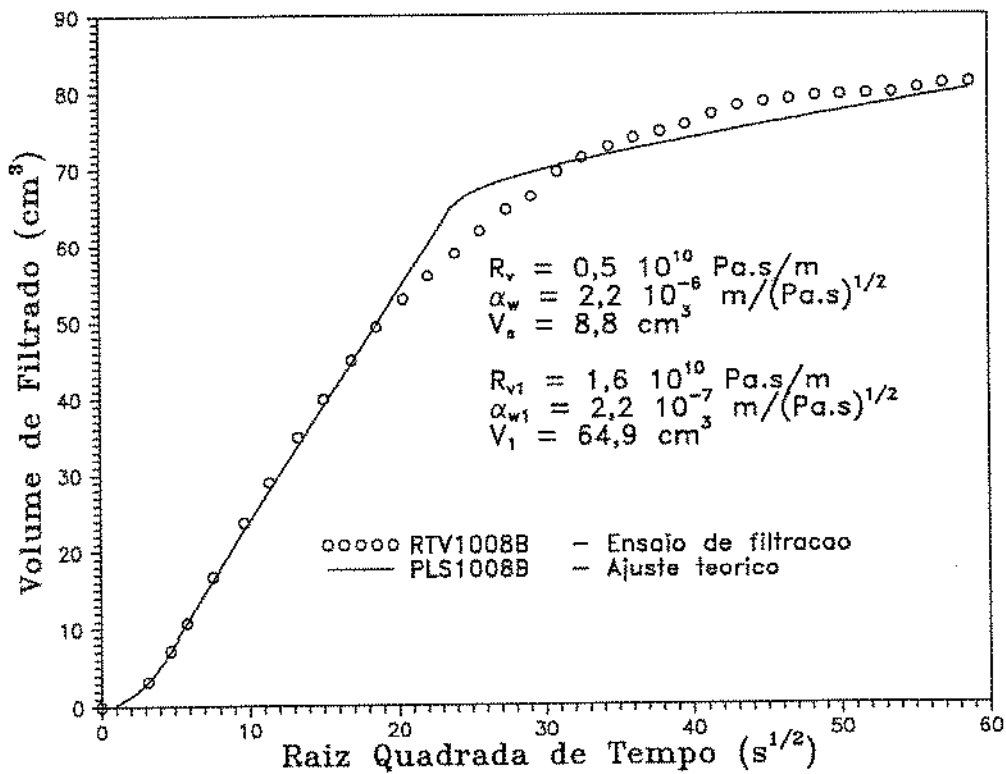


Figura 49: Ajuste dos dados experimentais conforme Poulsen (HPG  $3,6 \text{ kg}/\text{m}^3$ )

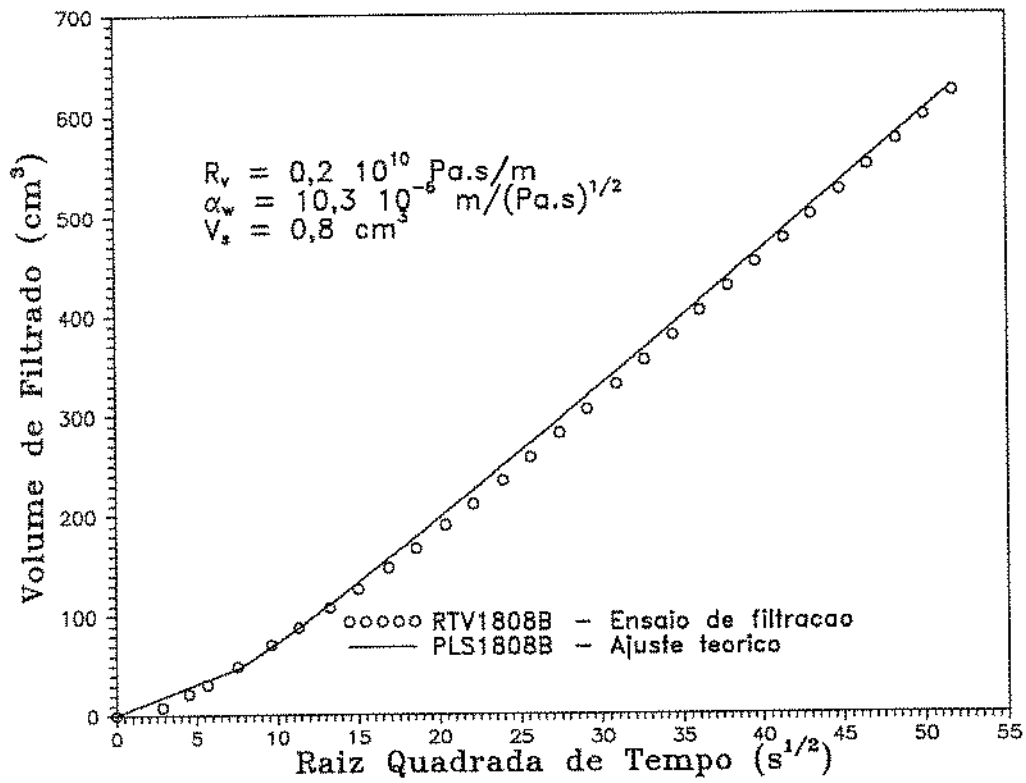


Figura 50: Ajuste dos dados experimentais conforme Poulsen (HPG  $3,6 \text{ kg/m}^3$ )

O modelo representa com boa aproximação a curva de filtração experimental no trecho inicial e intermediário onde em média 67% do filtrado foi produzido.

As diferenças observadas, na fase final dos ensaios, entre os pontos experimentais e as curvas, mostram que a transição do valor de  $\alpha_w$  inicial para o seu valor  $\alpha_{w1}$  final se dá gradualmente. Quanto mais abruptamente isto ocorrer na realidade, caso de uma mudança de fluido, mais representativo será o modelo de dois  $\alpha_w$ .

### 4.3.2 Fluido Viscoso Reticulado

A reticulação do fluido e conseqüentemente a alteração do arranjo das moléculas do polímero oferecem um meio eficiente de conter a filtração de soluções poliméricas, tanto na sua fase inicial como na fase de crescimento do reboco. Esta afirmação foi comprovada através dos ensaios relacionados na tabela 6. O valor de  $\alpha_w$  foi em média 14 vezes inferior ao obtido da primeira fase da filtração com fluido linear e 3,7 vezes inferior ao da segunda fase. A redução da permeabilidade do plugue na fase que antecede a formação do reboco também foi mais acentuada nos ensaios com o fluido reticulado. Enquanto com o fluido linear a média de permeabilidade passou de  $4 \cdot 10^{-2} \mu m^2$  para  $1,6 \cdot 10^{-3} \mu m^2$ , com o fluido reticulado a variação foi de  $4,3 \cdot 10^{-2} \mu m^2$  para  $3,7 \cdot 10^{-4} \mu m^2$ .

A variação de  $\alpha_w$  com a pressão é inversamente proporcional à  $\Delta P^{0,7}$ . Deste modo a taxa de filtração é inversamente proporcional a  $\Delta P^{0,2}$ , o que não pode ser explicado com base apenas no modelo clássico de reboco compressível.

A temperatura, segundo o modelo, modifica o valor de  $\alpha_w$ , na razão inversa da raiz quadrada da viscosidade do filtrado. Entretanto, isto justifica uma variação de apenas 39% em  $\alpha_w$ , enquanto na realidade esta variação foi de 255%. As soluções poliméricas, no caso as soluções reticuladas com o íon borato, têm o seu processo de degradação acelerado com o aumento da temperatura. No ensaio realizado à temperatura mais elevada, esta

Ensaio	$\Delta P$ (MPa)	$C_a$ ( $V \times t^{1/2}$ ) ( $cm^3/s^{0,5}$ )	$C_l$ ( $V \times t^{1/2}$ ) ( $cm^3$ )	$C_a$ ( $V \times t$ ) ( $cm^3/s$ )	$R_v$ (Pa.s/m). $10^{10}$	$\alpha_w$ ( $m/(Pa.s)^{0,5}$ ). $10^{-8}$	$V_s$ ( $cm^3$ )
1208	3,4	0,1004	-0,457	0,0132	7,62	9,21	-0,1
1308B	5,1	0,0854	1,048	0,0472	3,20	6,39	1,1
1408	6,8	0,0884	0,468	0,0251	7,99	5,74	0,6
1508A	5,2	0,0869	0,451	0,0291	5,27	6,45	0,6
1508B	5,2	0,3091	-2,776	0,0377	4,07	22,9	-1,5
1608	5,2	0,0556	0,163	0,0171	8,92	4,15	0,3
1808A	5,2	0,0953	1,193	0,0327	4,72	7,05	1,3
1808C	5,1	0,0819	0,716	0,0673	2,26	6,12	0,8

Tabela 6: Análise de Poulsen - Fluido Reticulado

degradação já foi observada e é a responsável pela parcela maior da variação de  $\alpha_w$ .

O comportamento de  $\alpha_w$  em relação à vazão de circulação observado para o fluido linear se repetiu para o fluido reticulado. A figura 51 mostra uma variação linear de  $\alpha_w$  com a raiz quadrada da vazão de circulação  $Q$ .

O uso de um plugue de permeabilidade mais elevada não correspondeu a um aumento de  $\alpha_w$ . Ao contrário, foi observada uma redução de 4%. Deve ser notado porém que, no momento do início da formação do reboco, a permeabilidade do plugue, obtida a partir de  $R_v$ , era de apenas  $9,7 \cdot 10^{-4} \mu m^2$ , cerca de 280 vezes menor que a sua permeabilidade original, o que torna o resultado coerente.

As figuras 52 a 59 apresentam as curvas completas de filtração, obtidas a partir dos parâmetros da tabela 6, e os dados experimentais correspondentes.

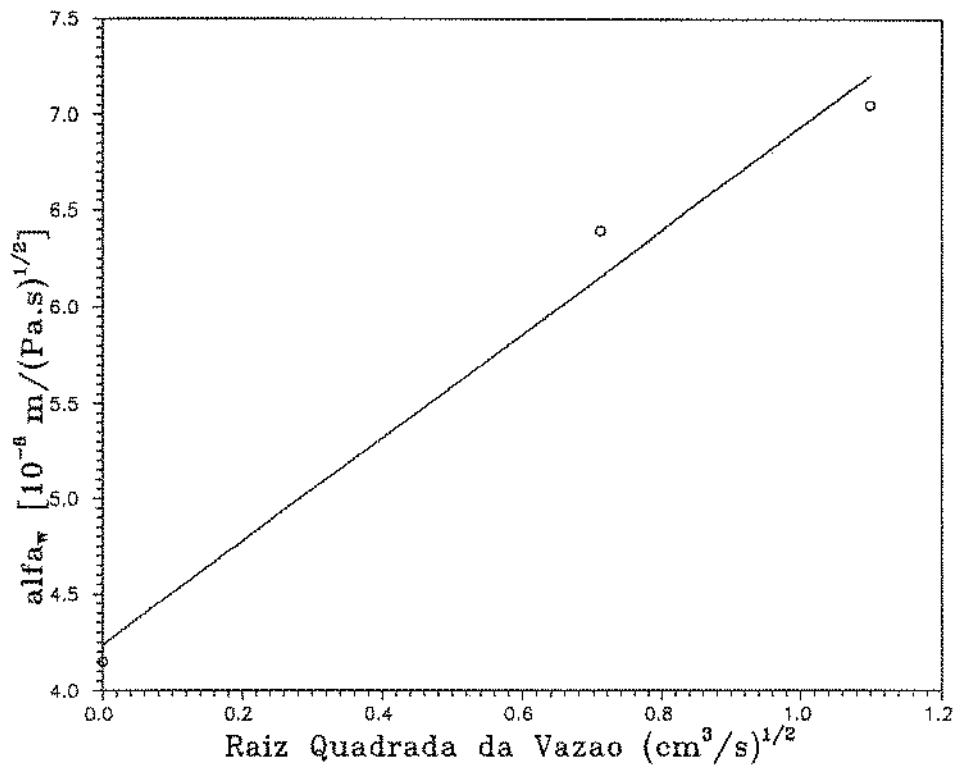


Figura 51: Vazão de circulação x  $\alpha_w$

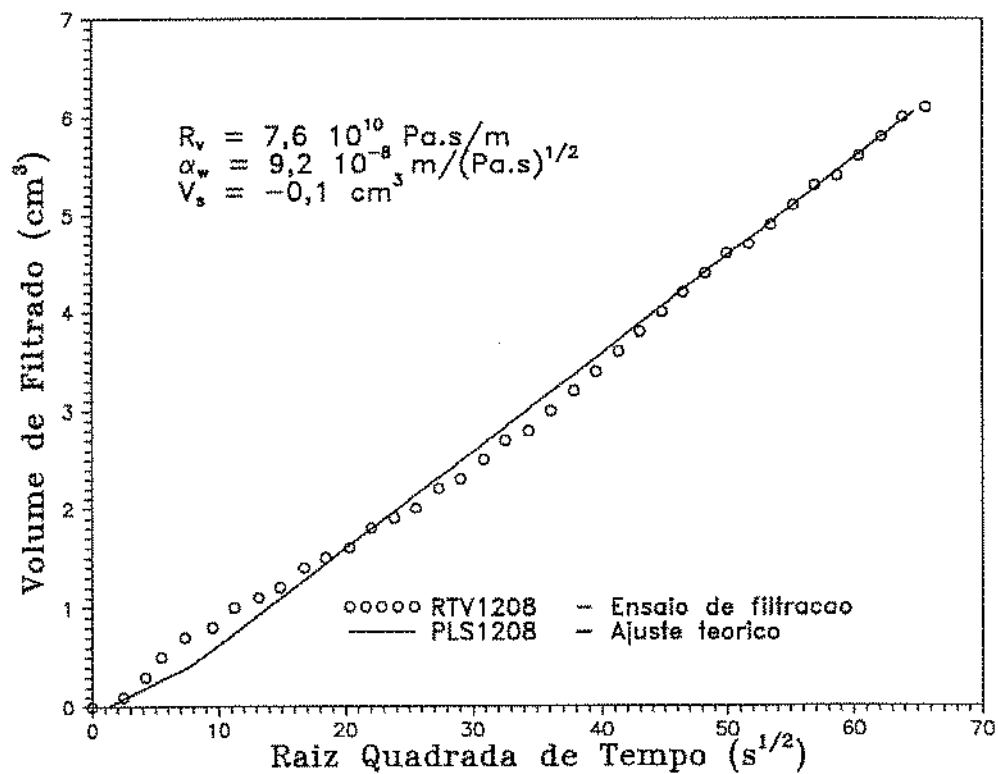


Figura 52: Ajuste dos dados experimentais conforme Poulsen (HPG reticulado)

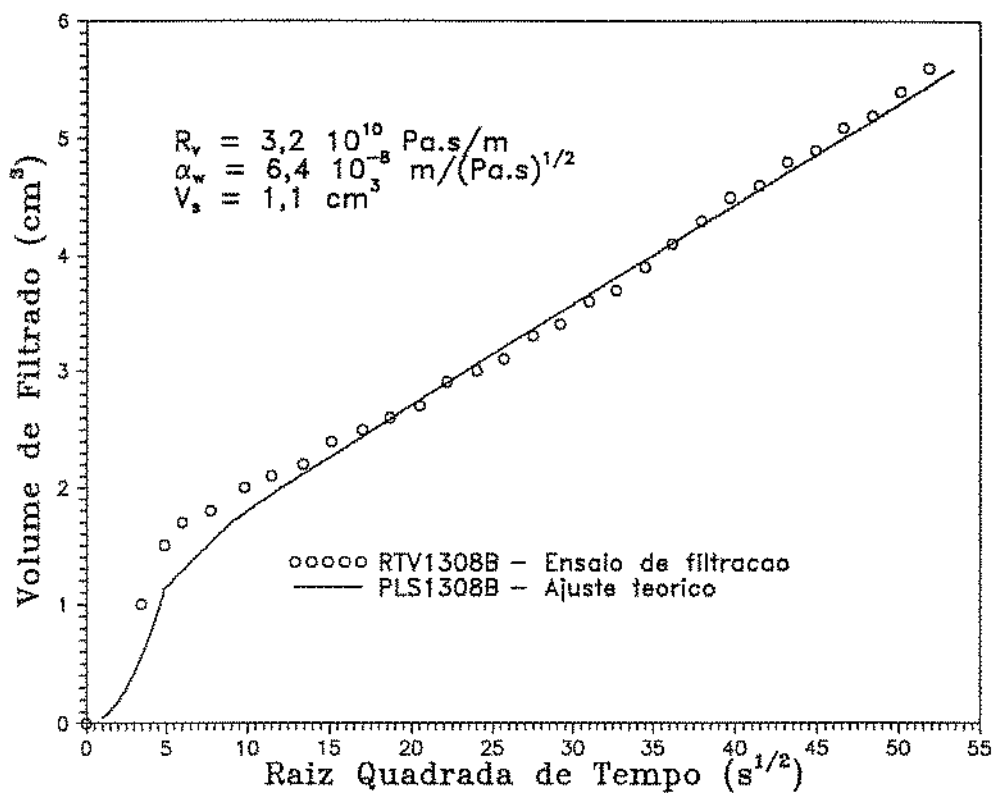


Figura 53: Ajuste dos dados experimentais conforme Poulsen (HPG reticulado)

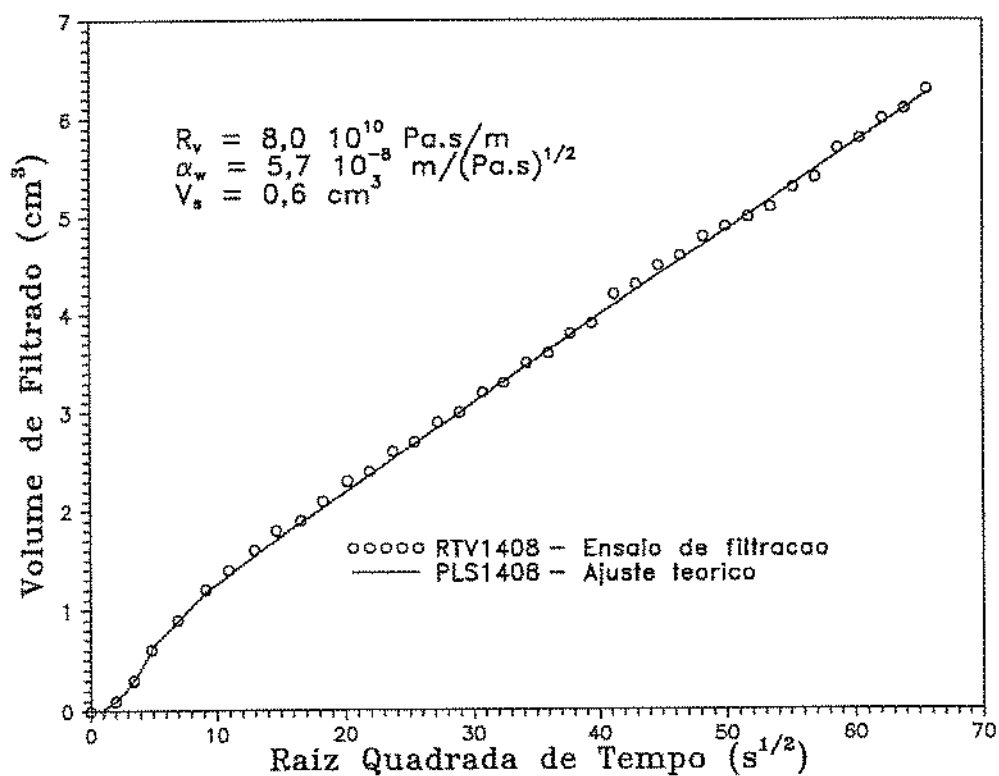


Figura 54: Ajuste dos dados experimentais conforme Poulsen (HPG reticulado)



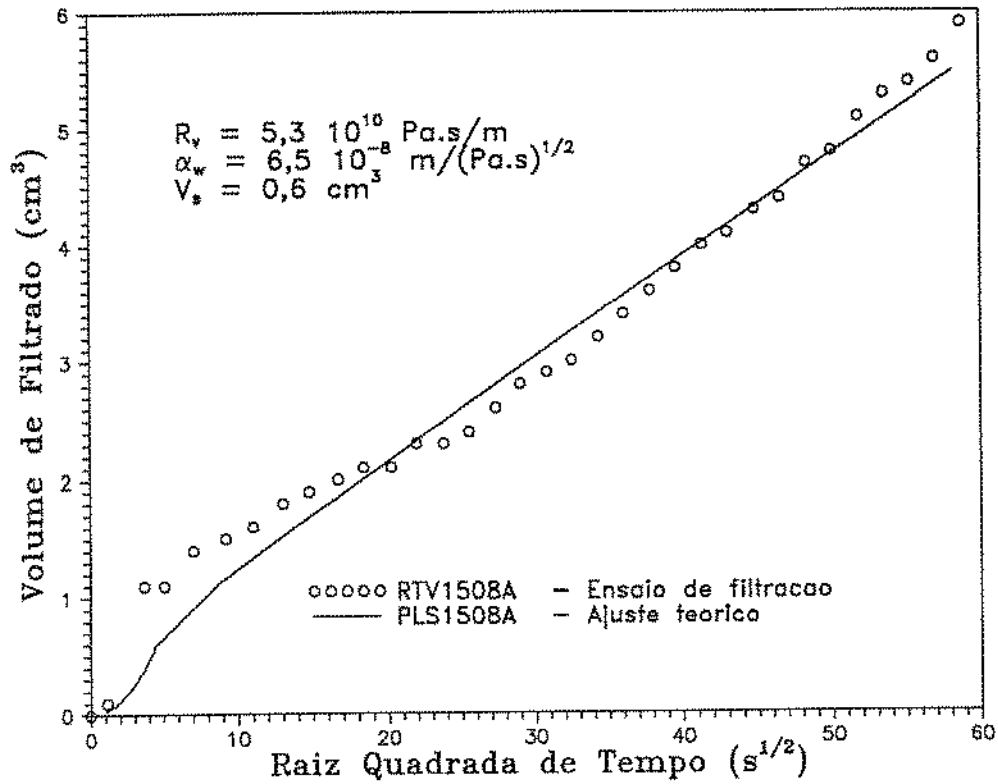


Figura 55: Ajuste dos dados experimentais conforme Poulsen (HPG reticulado)

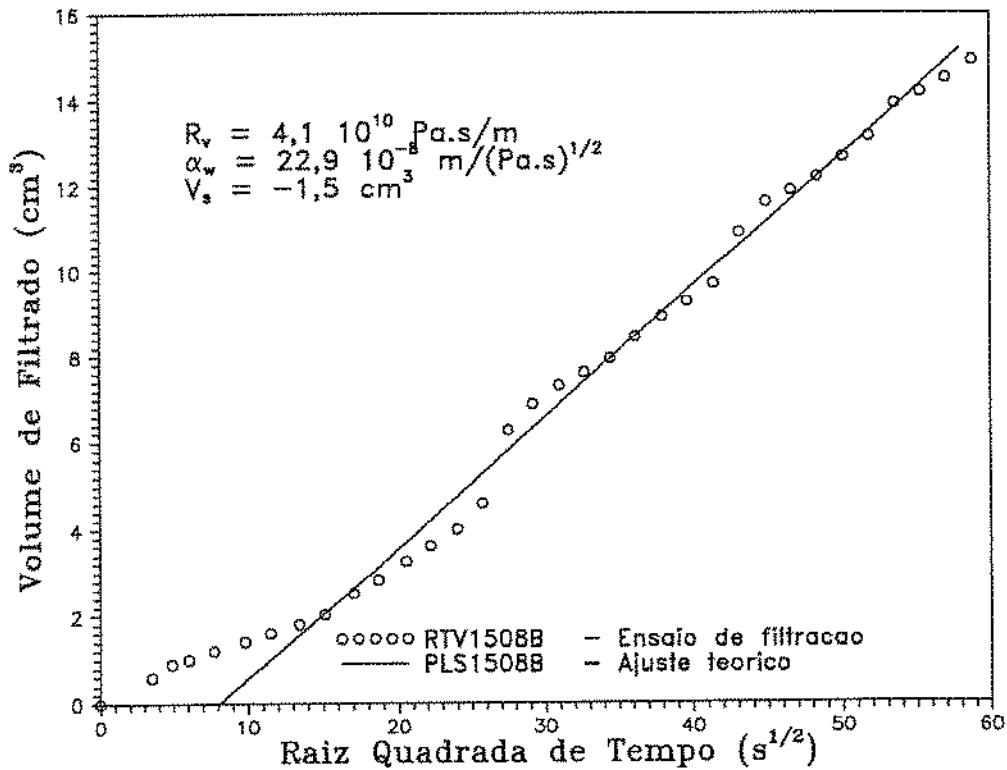


Figura 56: Ajuste dos dados experimentais conforme Poulsen (HPG reticulado)

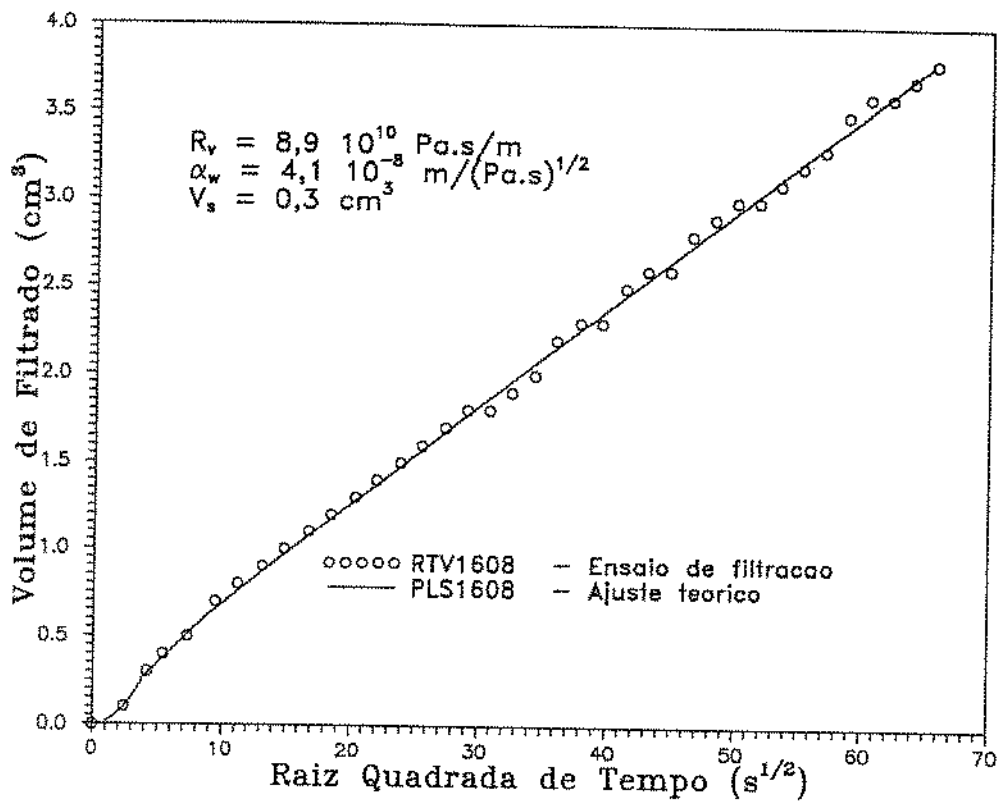


Figura 57: Ajuste dos dados experimentais conforme Poulsen (HPG reticulado)

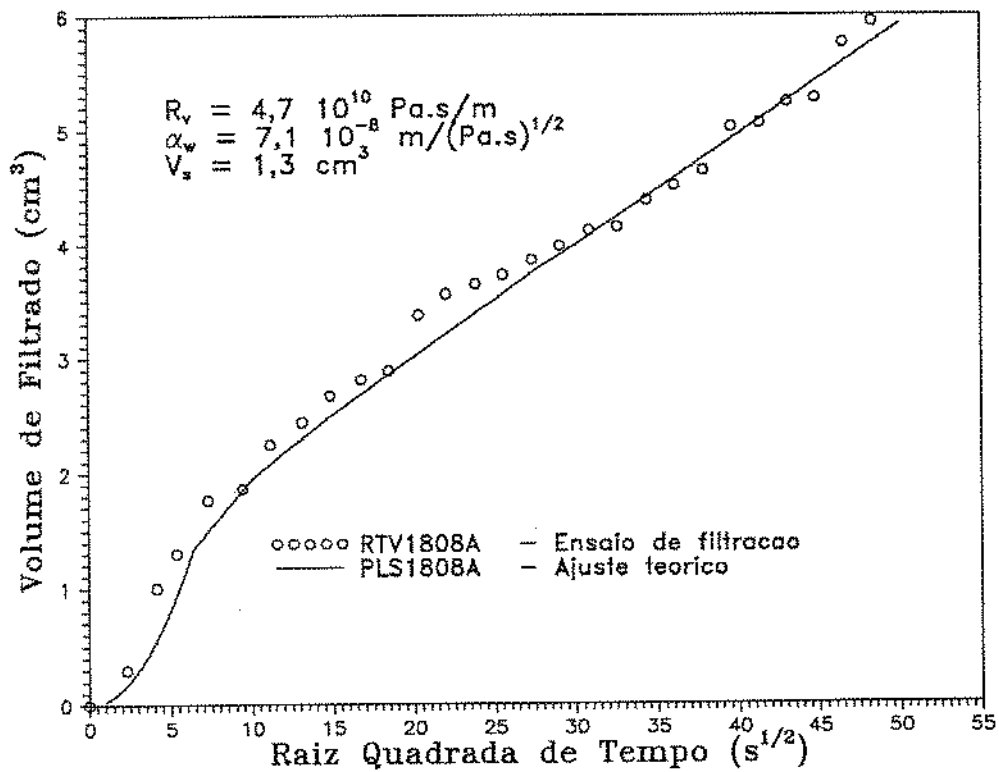


Figura 58: Ajuste dos dados experimentais conforme Poulsen (HPG reticulado)

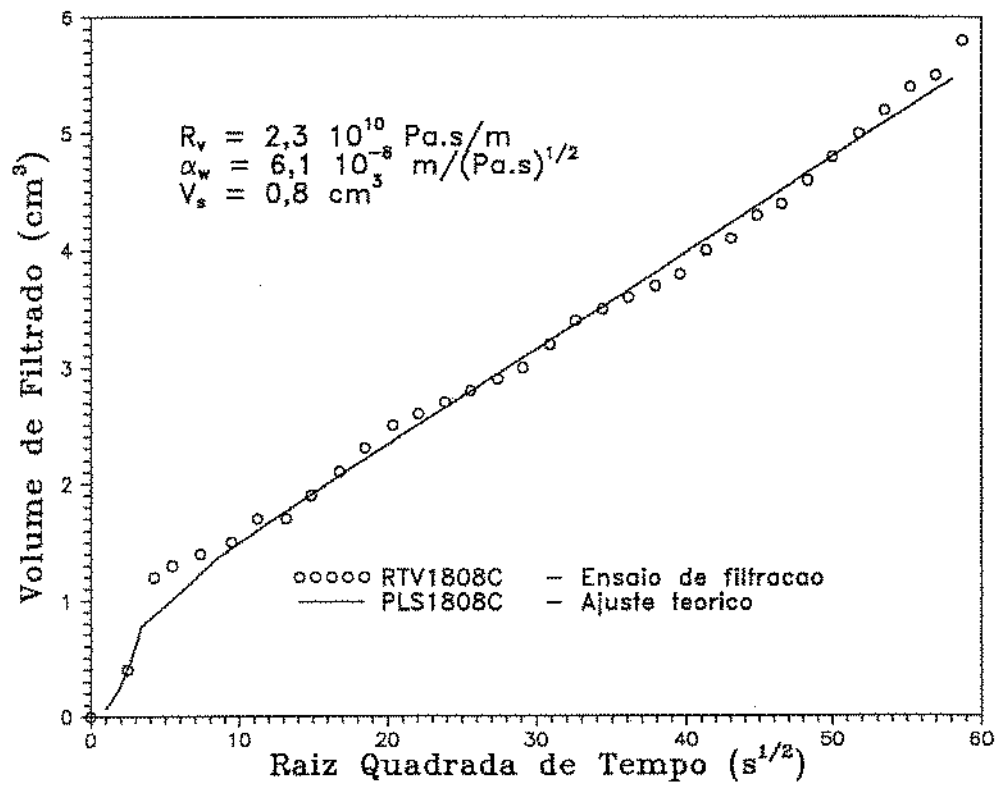


Figura 59: Ajuste dos dados experimentais conforme Poulsen (HPG reticulado)

As diferenças encontradas estão ligadas mais à forma da curva experimental que, ao contrário do indicado por Poulsen (fig. 60), na maioria das vezes não tem a concavidade voltada para baixo <sup>6</sup>. Isto faz com que os dados experimentais na fase de transição, quando a filtração passa a ser influenciada pelo reboco, se afastem dos pontos previstos pelo modelo.

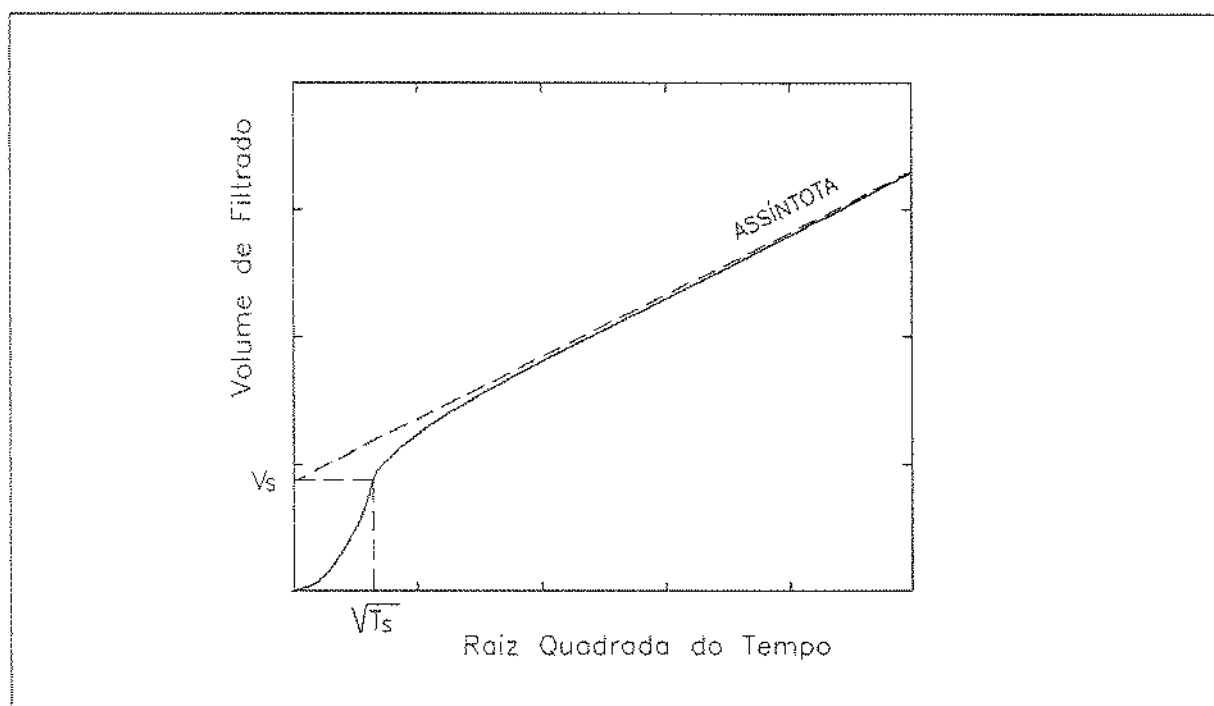


Figura 60: Curva de filtração teórica apresentada por Poulsen

<sup>6</sup>Em lugar de se obter os dados da tabela 6 a partir de uma assíntota que se aproxima da curva por cima, se faz através da reta que melhor se ajusta aos pontos no intervalo.

#### 4.4 Análise dos ensaios de filtração conforme o modelo proposto por Medlin

O trabalho desenvolvido por Medlin considera assim como o de Poulsen, que a filtração se processa em duas fases, sendo uma conhecida como a fase de invasão e a outra como a fase de construção do reboco. O que diferencia um método do outro é o tipo de ajuste feito para determinar os parâmetros da filtração. Medlin obtém os valores da mobilidade do filtrado, associada ao escoamento no plugue e no reboco, a partir do ajuste dos dados à equação que rege a filtração na fase de crescimento do reboco. Poulsen, por outro lado, obtém o valor da mobilidade do filtrado no plugue a partir dos dados da fase inicial, que precede a formação do reboco, e a mobilidade no reboco, ajustando os dados à solução de longo tempo. De resto, os dois modelos se baseiam na teoria clássica da filtração com formação de reboco.

A expressão que representa a filtração após a fase de invasão, no modelo de Medlin, é dada por

$$t = \frac{\alpha}{A^2} (V - V_0)^2 + \frac{\beta}{A} (V - V_0) + \gamma \quad (24)$$

O método de análise proposto por Medlin para a obtenção dos coeficientes da equação consiste em ajustar os dados do ensaio ao polinômio do segundo grau, fazendo variar o valor de  $V_0$ . O ajuste adequado é aquele que faz  $\gamma = t(V_0)$ .

A tabela 7 apresenta os coeficientes obtidos através deste método, referentes aos ensaios de filtração de fluido reticulado.

Ensaio	$\alpha$ (s/cm <sup>2</sup> )	$\beta$ (s/cm)	$\gamma$ (s)	$V_0$ (cm <sup>3</sup> )	$\lambda$ (cm <sup>3</sup> .s/g).10 <sup>-11</sup>	$a$ (cm <sup>3</sup> .s/g).10 <sup>-11</sup>
1208	702,88	998,24	47,22	0,70	10,0	2,1
1308B	806,04	1210,58	128,4	2,10	5,5	1,2
1408	1110,59	718,01	108,4	1,40	7,0	0,7
1508A	366,51	1859,61	186,9	1,80	3,5	2,6
1608	2750,13	1088,40	87,83	0,70	6,1	0,4
1808A	806,80	890,19	69,21	2,25	7,3	1,2
1808C	768,28	1475,44	57,74	1,70	5,5	1,3

Tabela 7: Análise de Medlin - Fluido Reticulado

O coeficiente  $a = 1 / (2\alpha P_a)$  é proporcional à mobilidade do filtrado no reboco enquanto o coeficiente  $\lambda = L / (\beta P_a)$  representa a mobilidade no plugue após o término da invasão.

Em relação ao método de Poulsen, os valores da mobilidade do filtrado dados por Medlin são em média 91% menores na fase inicial da filtração e 56% superiores na fase de construção do reboco. Este resultado mostra que a resistência  $R_v$  final é maior que aquela medida com base no ajuste dos dados da fase inicial da filtração .

Um exame dos valores de  $a$  na tabela 7 confirma o resultado obtido na análise de Poulsen em relação à pressão e à permeabilidade do plugue.

Os dados do ensaio realizado a alta temperatura não se ajustaram bem ao modelo, impedindo uma comparação com o ensaio realizado a temperatura ambiente.

Quanto à mobilidade do filtrado em um reboco formado em condição dinâmica, não houve modificação quando do aumento da vazão de circulação . Por outro lado, a mobilidade aumentou 2 vezes em relação à condição estática.

Os valores de  $\lambda$  mostrados na tabela 7 indicam que o início da formação do reboco se dá quando a mobilidade atinge um determinado valor, conforme previsto no modelo. No caso, o valor médio da mobilidade foi de  $6,4 \cdot 10^{-14} m^2 / (Pa \cdot s)$  com desvio padrão de  $1,86 \cdot 10^{-14} m^2 / (Pa \cdot s)$ .

As figuras 61 a 67 mostram uma comparação dos resultados experimentais com as curvas dadas pelo modelo.

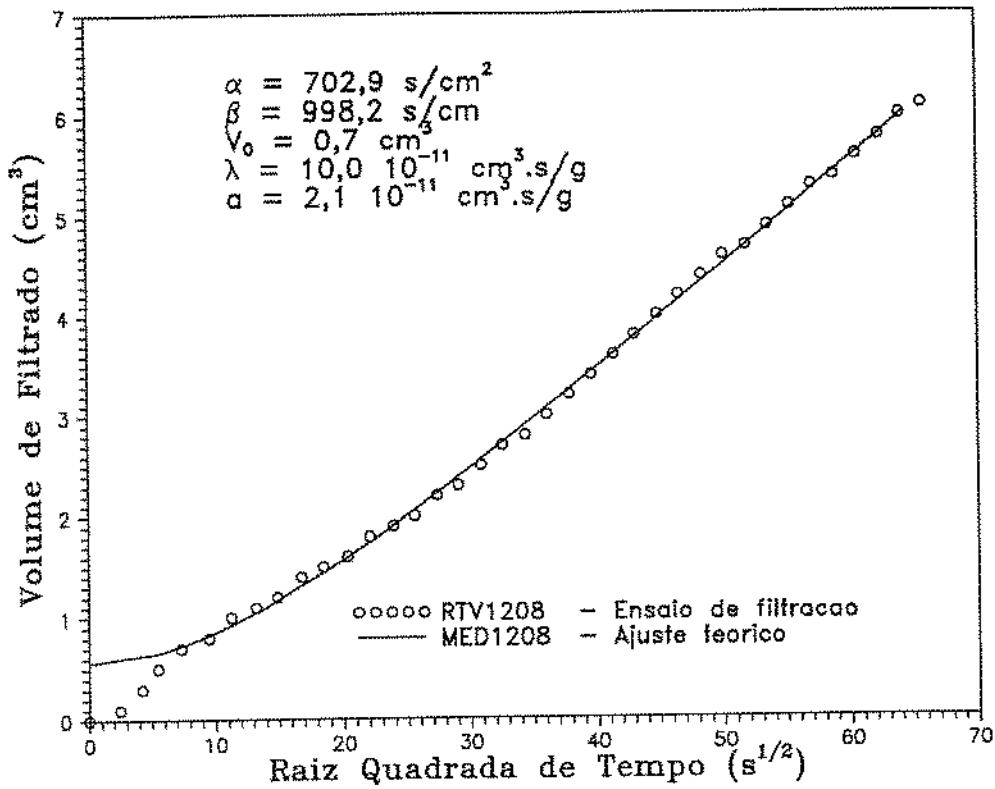


Figura 61: Ajuste dos dados experimentais conforme Medlin (HPG reticulado)

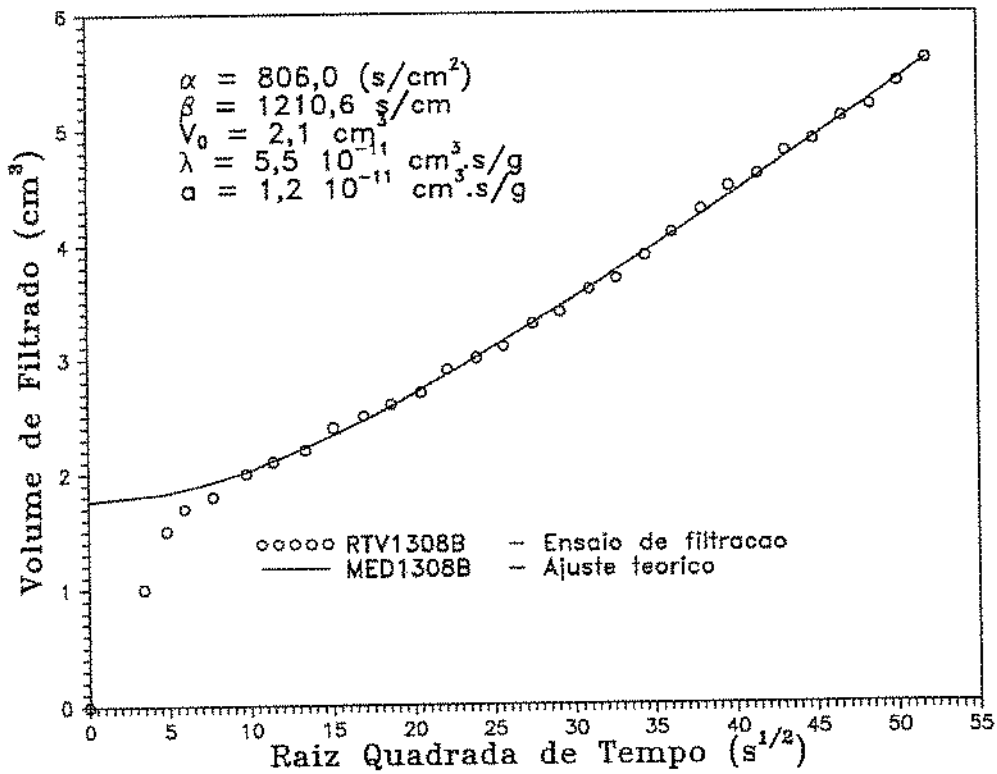


Figura 62: Ajuste dos dados experimentais conforme Medlin (HPG reticulado)



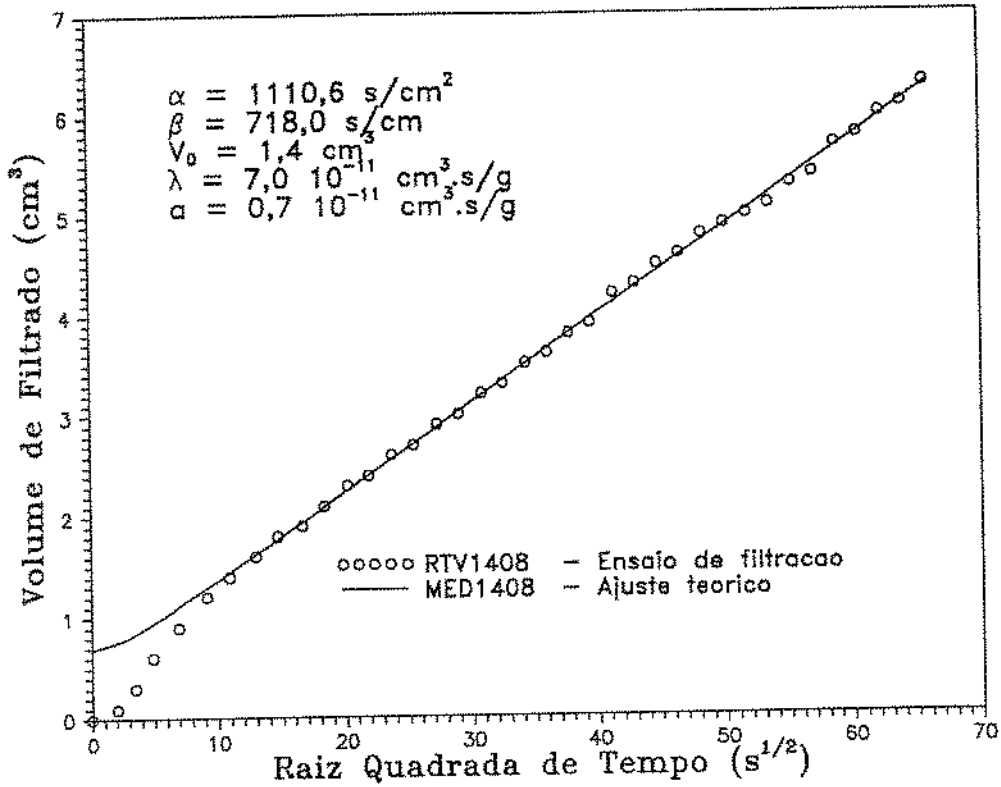


Figura 63: Ajuste dos dados experimentais conforme Medlin (HPG reticulado)

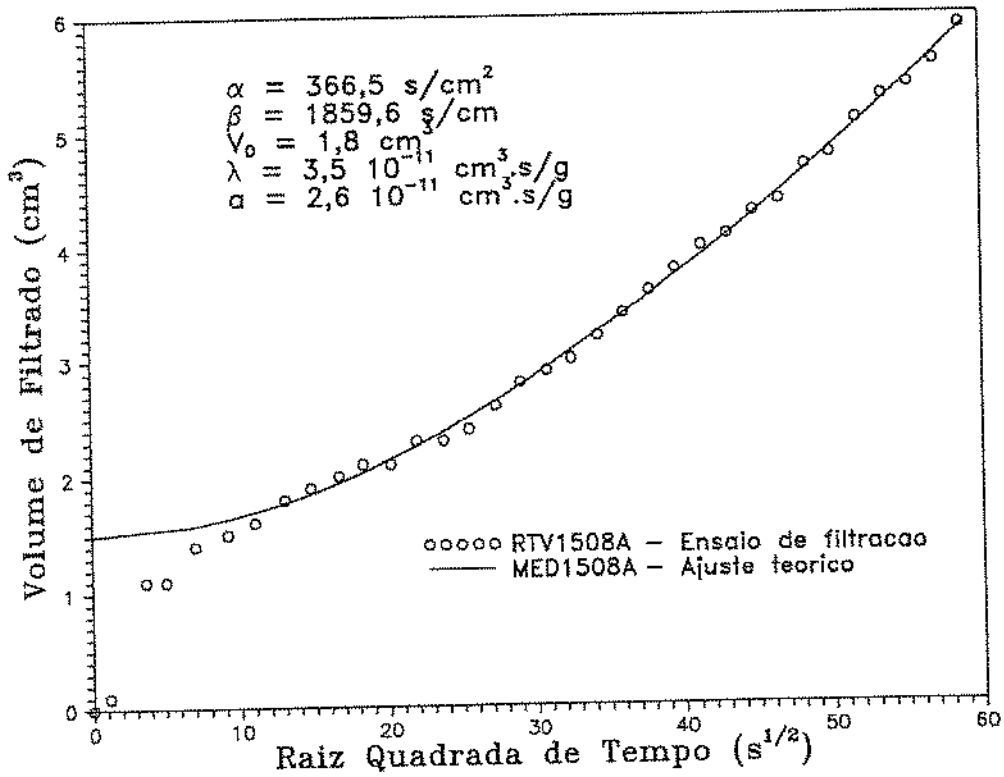


Figura 64: Ajuste dos dados experimentais conforme Medlin (HPG reticulado)

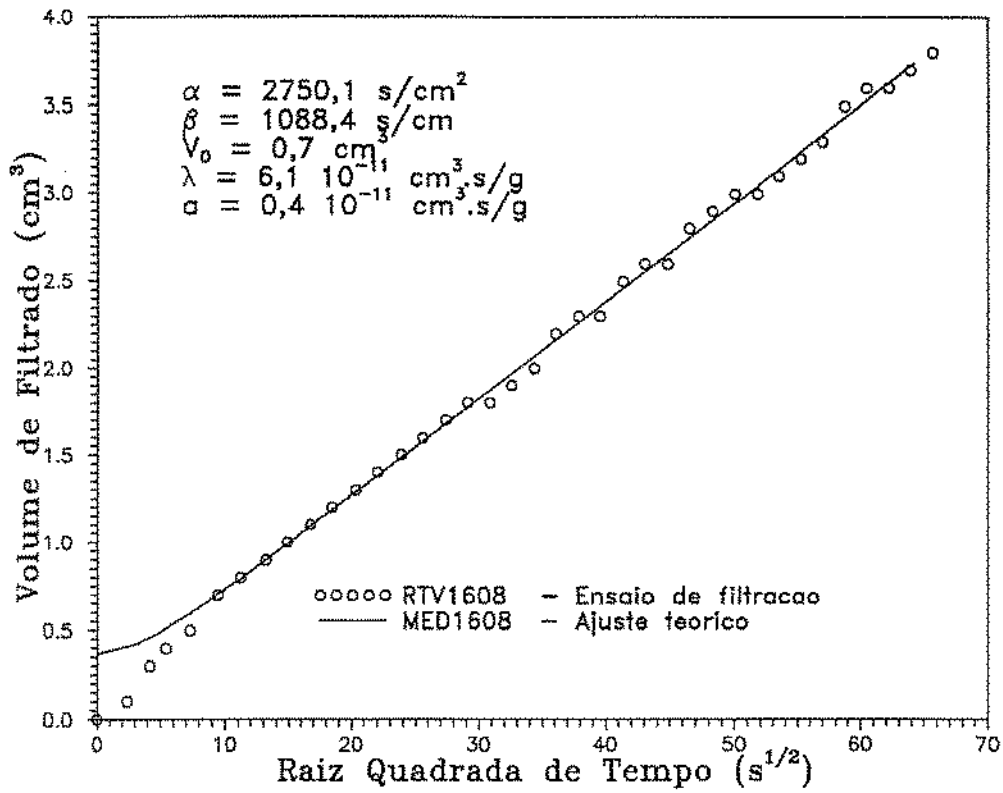


Figura 65: Ajuste dos dados experimentais conforme Medlin (HPG reticulado)

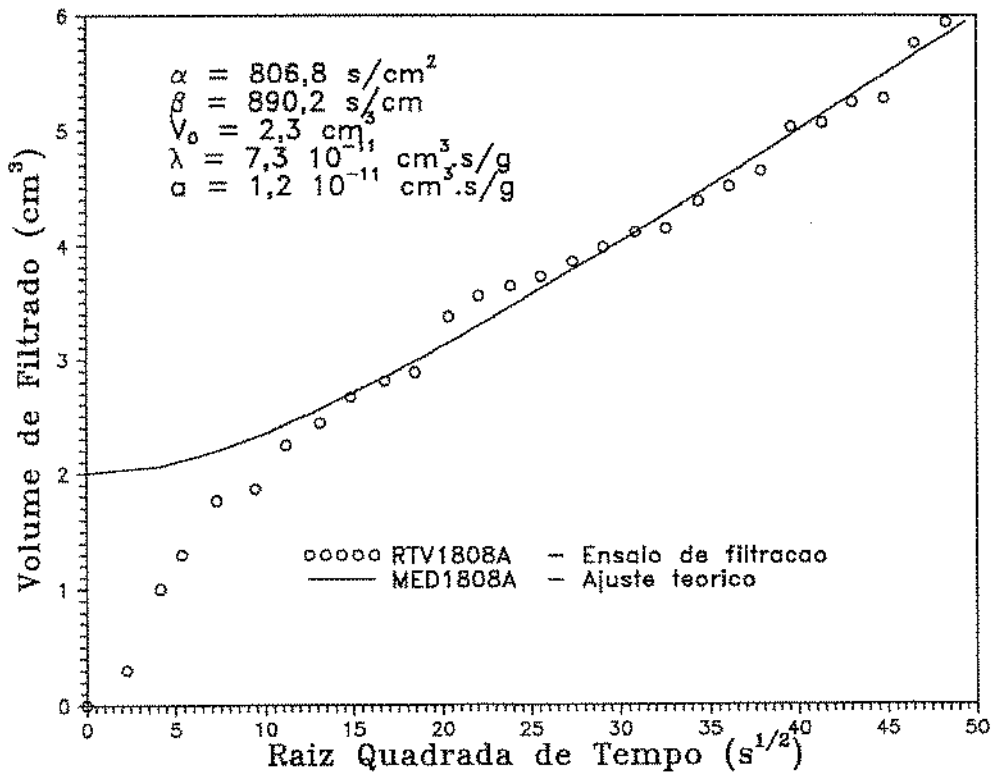


Figura 66: Ajuste dos dados experimentais conforme Medlin (HPG reticulado)

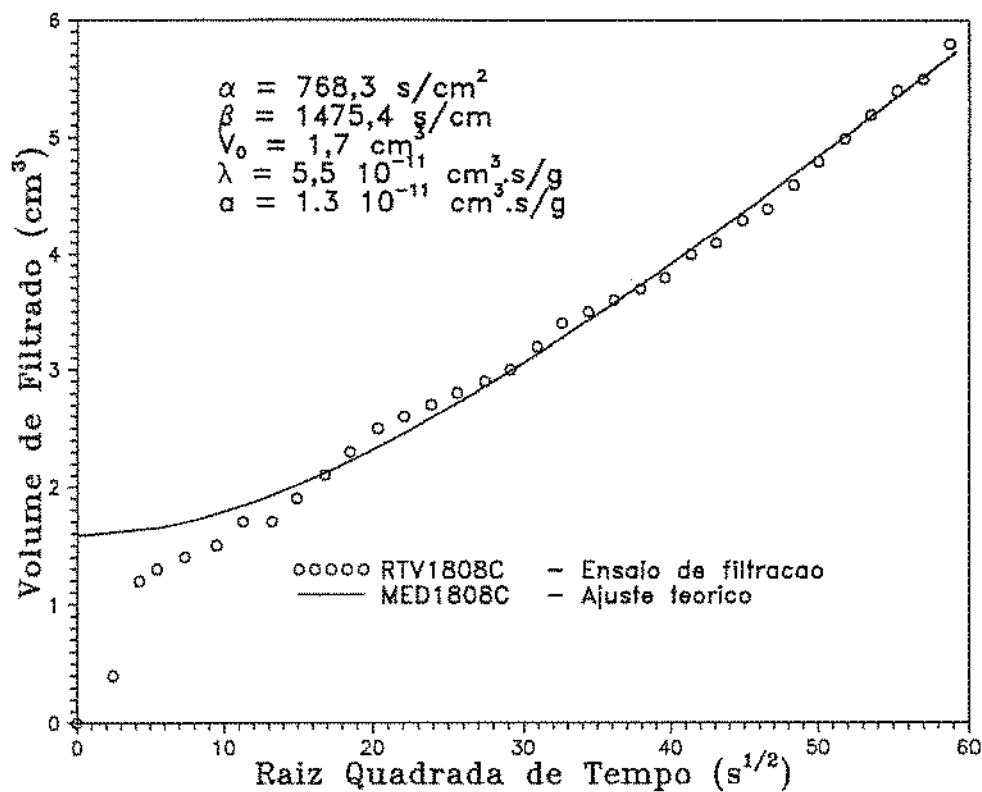


Figura 67: Ajuste dos dados experimentais conforme Medlin (HPG reticulado)

No modelo de Medlin a curva proposta para representar a filtração na segunda fase tem uma concavidade voltada para cima (fig. 68) o que garante uma melhor representação dos dados experimentais.

A curva de filtração para ser completa necessita de uma expressão para a fase de invasão. Medlin sugere que a escolha deva ser feita com base nos resultados dos ensaios. Para alguns casos a aproximação linear é suficiente mas em outros um ajuste parabólico é uma melhor escolha.

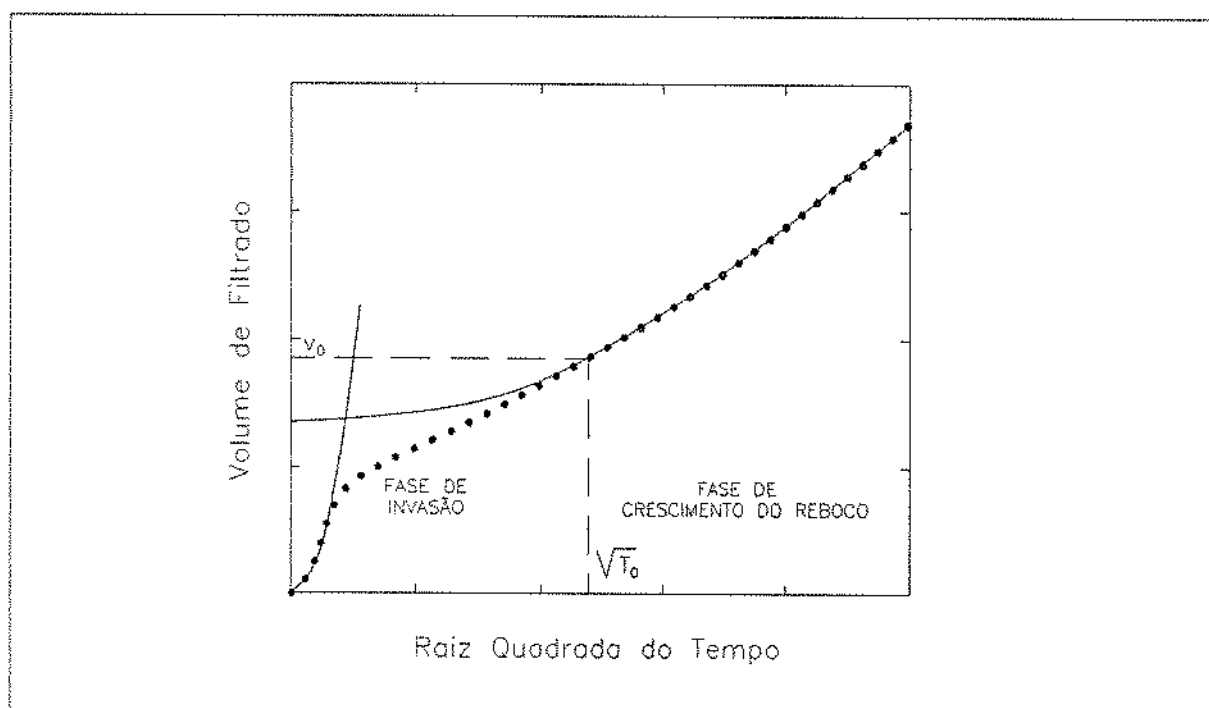


Figura 68: Curva de filtração teórica apresentada por Medlin

## 5 Conclusões e Recomendações

### 5.1 Conclusões

O estudo da filtração de um fluido de fraturamento realizado neste trabalho compreendeu a elaboração de ensaios de filtração estática e dinâmica em um equipamento capaz de simular condições de escoamento semelhantes às aquelas encontradas na fratura hidráulica. A análise dos resultados foi feita a partir de três modelos conhecidos, baseados na teoria simplificada da filtração .

As principais conclusões obtidas foram as seguintes:

- Os ensaios de filtração com fluido linear mostraram que a permeabilidade do reboco diminui no decorrer do ensaio de filtração . A representação deste fenômeno pôde ser obtida satisfatoriamente através do modelo de Poulsen, assumindo que a partir de um dado momento, tem início uma segunda fase de formação de reboco com propriedades distintas;
- O modelo apresentado por McCabe é insuficiente para representar a curva completa de filtração do fluido linear;
- O modelo apresentado por Medlin representou adequadamente a filtração de fluido reticulado;
- O escoamento tangencial do fluido paralelamente à face do plugue reduz a resistência do reboco à filtração para os dois tipos de fluidos testados;

- A variação da pressão não alterou significativamente o comportamento da filtração do fluido reticulado;
- No caso do fluido linear, o aumento da pressão faz com que a redução da permeabilidade do reboco durante a filtração seja menos acentuada;
- O aumento da temperatura favorece a filtração dos dois tipos de fluido. No caso, o aumento supera a previsão baseada na redução da viscosidade do filtrado;
- A variação da permeabilidade do plugue não altera significativamente a taxa de filtração do fluido reticulado, mas é fundamental na filtração de fluido linear;
- A eficiência do fluido reticulado é maior que a do fluido linear em quaisquer condições ;
- A realização de ensaios de filtração simulando as condições de fundo é fundamental para a determinação correta das dimensões de uma fratura hidráulica.

## 5.2 Recomendações

A seguir apresentamos sugestões para a continuação do trabalho:

- Analisar os efeitos provocados na filtração , decorrentes da adição de quebrador no fluido de fraturamento;
- Analisar a eficiência dos agentes inibidores de perda de filtrado;

- Estudar a variação das propriedades reológicas do filtrado no decorrer da filtração ;
- Elaborar um estudo do processo de crescimento do reboco através da utilização de sondas;
- Analisar o efeito da variação momentânea da pressão na compressibilidade e resistência mecânica do reboco;
- Efetuar um estudo comparativo dos resultados obtidos experimentalmente através de ensaios de filtração com aqueles fornecidos a partir dos dados de campo.

## NOMENCLATURA

$a$	coeficiente angular da equação linear que representa um ensaio de filtração
$a$	parâmetro do modelo de Medlin
$A$	área transversal ao escoamento de filtrado
$A$	área da fratura
$A_{ff}$	área de uma face da fratura
$A_p$	área da superfície de uma partícula
$c$	massa de sólidos depositada por unidade de volume de filtrado
$c_f$	compressibilidade isotérmica do fluido do reservatório
$C$	coeficiente de fluido de fraturamento
$C_1$	coeficiente de fluido de fraturamento associado à invasão de filtrado
$C_2$	coeficiente de fluido de fraturamento associado à compressibilidade do fluido do reservatório
$C_3$	coeficiente de fluido de fraturamento associado à formação do reboco
$C_a$	coeficiente angular
$C_{a1}$	coeficiente angular da segunda fase de formação do reboco
$C_l$	coeficiente linear
$C_{l1}$	coeficiente linear da segunda fase de formação do reboco
$d$	diâmetro equivalente dos canais do meio poroso



$F_v$	forças viscosas
$g$	aceleração da gravidade
$h$	energia por unidade de peso de fluido
$i(t)$	taxa de injeção de fluido de fraturamento no poço
$i_L(t)$	taxa de injeção de filtrado na formação
$k$	permeabilidade do meio poroso
$k$	permeabilidade do plugue
$k'$	constante que depende da estrutura do meio poroso
$k''$	constante de Kozeny
$k_v$	permeabilidade da zona invadida
$k_c$	permeabilidade do reservatório
$k_{ws}$	permeabilidade do reboco
$K$	condutividade hidráulica
$l$	espessura do leito poroso
$l$	distância da face do filtro a um elemento de reboco $dl$
$l'$	comprimento dos canais do meio poroso
$L$	comprimento do plugue
$L_c$	espessura do reboco
$m$	massa
$m_c$	massa de sólidos no reboco

$P$	pressão
$P$	pressão em uma seção do reboco
$P_a$	pressão a montante do reboco
$P_b$	pressão a jusante do filtro
$P_b$	pressão na interface do filtrado com o fluido do reservatório
$P_R$	pressão estática do reservatório
$P_w$	pressão na interface do filtro com o reboco
$Q$	vazão de filtrado
$Q$	vazão de circulação do fluido através da célula de filtração
$Q_f$	taxa de crescimento do volume da fratura
$R_c$	resistência à filtração relativa ao reservatório
$R_m$	resistência do meio filtrante
$R_v$	resistência à filtração relativa à zona invadida pelo filtrado
$R_{v1}$	resistência à filtração relativa à zona invadida pelo filtrado na segunda fase da filtração
$R_w$	resistência à filtração relativa ao reboco
$s$	constante empírica para calcular a variação de $\alpha$ com $\Delta P$
$S$	área superficial específica
$t$	tempo
$t_0$	tempo inicial a partir do qual deixa de existir variação na mobilidade do filtrado

$t_1$	tempo para iniciar a segunda fase de formação do reboco
$t_s$	tempo correspondente à perda inicial $V_s$ de filtrado
$T$	temperatura do fluido durante o ensaio de filtração
$v$	velocidade média de filtração
$v(t)$	função velocidade de filtração na fratura
$v'$	velocidade média do fluido nos canais
$V$	volume de filtrado
$V_0$	volume inicial de filtrado
$V_1$	volume inicial de filtrado
$V_1$	volume de filtrado acumulado ao término da filtração do primeiro tipo de fluido
$V_p$	volume da partícula
$V_s$	perda inicial de filtrado
$W$	largura da fratura
$x$	variável auxiliar utilizada no cálculo da área da fratura
$x_v$	posição da frente de filtrado a partir da face do filtro
$z$	energia representativa da altura

#### Letras gregas

$\alpha$	resistência específica média do reboco
$\alpha$	parâmetro do modelo de Medlin

$\alpha_0$	constante empírica para calcular a variação de $\alpha$ com $\Delta P$
$\alpha_l$	resistência específica local do reboco
$\alpha_c$	coeficiente de perda de filtrado relativo à compressão do fluido do reservatório
$\alpha_v$	coeficiente de perda de filtrado relativo à zona invadida
$\alpha_w$	coeficiente de perda de filtrado relativo ao reboco
$\alpha_{w1}$	coeficiente de perda de filtrado relativo à segunda fase de formação de reboco
$\alpha_{ww}$	coeficiente de perda de filtrado combinado
$\beta$	parâmetro do modelo de Medlin
$\beta$	constante empírica para calcular a variação de $\alpha$ com $\Delta P$
$\Delta P$	diferença de pressão total na filtração
$\Delta P_c$	queda de pressão no reservatório
$\Delta P_v$	queda de pressão na zona invadida pelo filtrado
$\Delta P_w$	queda de pressão no reboco
$\gamma$	parâmetro do modelo de Medlin
$\lambda$	tempo requerido para o fluido alcançar um determinado ponto na fratura
$\lambda$	mobilidade do filtrado
$\mu$	viscosidade
$\mu_r$	viscosidade do fluido do reservatório
$\nu$	volume de reboco depositado por unidade de volume de filtrado
$\phi$	porosidade

- $\rho$  massa específica do fluido
- $\rho_p$  massa específica das partículas

## Referências

- [1] Howard, G. C. e Fast, C. R.: "Hydraulic Fracturing", Monograph Volume 2, Henry L. Doherty Series, Society of Petroleum Engineers, Dallas, TX (1970).
- [2] Hall, C. D. Jr. e Dollarhide, F. E.: "Effects of Fracturing Fluid Velocity on Fluid Loss Agent Performance", J. Pet. Tech. (May 1964) 555-560.
- [3] Hall, C. D. Jr. e Dollarhide, F. E.: "Performance of Fracturing Fluid Loss Agents Under Dynamic Conditions", J. Pet. Tech. (July 1968) 763-769.
- [4] Sinha, B. K.: "Fluid Leak-off Under Dynamic and Static Conditions Utilizing the Same Equipment", paper SPE 6126, apresentado no 51<sup>rd</sup> Annual Technical Conference and Exhibition, ocorrido em New Orleans, Louisiana, de 3 a 6 de outubro de 1976.
- [5] Gulbis, J.: "Dynamic Fluid Loss of Fracturing Fluids", paper SPE 12154, apresentado no 58<sup>th</sup> Annual Fall Technical Conference and Exhibition, ocorrido em San Francisco, California, de 5 a 8 de outubro de 1983.
- [6] Penny, G. S., Conway, M. W. e Lee, W.: "Control and Modeling of Fluid Leak-off During Hydraulic Fracturing", J. Pet. Tech. (June 1985) 1071-1081.
- [7] Ford, W. G. F. e Penny, G. S.: "Influence of Downhole Conditions on Leak-off Properties of Fracturing Fluids", SPE Production Engineering (Feb. 1988) 43-51.
- [8] Roodhart L. P.: "Fracturing Fluids: Fluid Loss Measurements Under Dynamic Conditions", SPE Journal (Oct. 1985) 629-636.
- [9] Harris P. C.: "Dynamic Fluid Loss Characteristics of Foam Fracturing Fluids", paper SPE 11065, apresentado no 57<sup>th</sup> Annual Fall Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers of AIME, ocorrido em New Orlean, Louisiana, de 26 a 29 de setembro de 1982.

- [10] Williams, B. B.: "Fluid Loss from Hydraulically Induced Fractures", J. Pet. Tech. (July 1970) 882-888.
- [11] McDaniel, R. R., Deysakar, A. K., Callanan, M. J. e Kohlhas, C. A.: "An Improved Method for Measuring Fluid Loss at Simulated Fracture Conditions", SPE Journal (Aug. 1985) 482-490.
- [12] Settari, A.: "A New General Model of Fluid Loss in Hydraulic Fracturing", SPE Journal (Aug. 1985) 491-501.
- [13] Zigrye, J. L., Whitfill, D. L. e Sievert, J. A.: "Fluid Loss Control Differences of Crosslinked and Linear Fracturing Fluid", J. Pet. Tech. (Feb. 1985) 315-320.
- [14] Clark, P. E. e Barbat, O.: "The Analysis of Fluid Loss Data", paper SPE 18971, apresentado no SPE Joint Rocky Mountain Regional / Low Permeability Symposium and Exhibition, ocorrido em Denver, Colorado, de 6 a 8 de março de 1989.
- [15] Harris, P. C. e Penny, G. S.: "Influence of Shear History at Bottomhole Temperature on Fracturing Fluid Efficiency", SPE Production Engineering (May 1989) 189-193.
- [16] Gidley, J. L., Holditch, S. A., Nierode, D. E. e Veatch, R. W. Jr.: "Recent Advances in Hydraulic Fracturing", Monograph Volume 12, Henry L. Doherty Series, Society of Petroleum Engineers, Richardson, TX (1989).
- [17] Poulsen D. K.: "Theoretical Treatment of Fracturing Fluid Loss", paper SPE 18262, apresentado no 63<sup>th</sup> Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, ocorrido em Houston, Texas, de 2 a 5 de outubro de 1988.
- [18] Medlin, W. L. e Massé, L.: "Fluid-Loss Mechanism for Gels and Suspensions", SPE Production Engineering (Nov. 1989) 385-393.
- [19] Coulson, J. M. e Richardson, J. F.: "Chemical Engineering", 125, McGraw Hill Book Company, Inc., New York, N.Y.

- [20] McCabe, W. L. e Smith, J. C.: "Unit Operation of Chemical Engineering", 884, McGraw Hill Book Company, Inc., New York, N.Y.
- [21] Tiller F. M.: "The Role of Porosity in Filtration I", Chemical Engineering Progress (Sep. 1953) 467-479.
- [22] Santos, P. R. F. e Orlando, A. F.: "An Experimental Study of The Static and Dynamic Filtration of Hydraulic Fracturing Fluid at Ambient Temperature", Tese de Mestrado, PUC-Rio, 1989.
- [23] Cheremisinoff, N. P.: "Encyclopedia of Fluid Mechanics", Volume 5, Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 1986.
- [24] Martins, J. A. S. e Rodrigues, V. F.: "Fraturamento Hidráulico Sob a Ótica Operacional", Apostila do Capro 1990, PETROBRAS, Rio de Janeiro, RJ, 1990.
- [25] API RP39, Recommended Practice, Standard Procedure for the Evaluation of Fracturing Fluids, API, Dallas (1983).
- [26] Gray, G. R., Darley, H. C. H.: "Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids", Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 1988.
- [27] Craft, B. C., Holden, W. R. e Graves, E. D.: "Well Design: Drilling and Production", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1962.
- [28] Massarani, G.: "Filtração", Revista Brasileira de Engenharia (Set. 1985).
- [29] Darcy, H.: "Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon", Dalmont, Paris (1856).
- [30] Penny, G. S.: "Evaluation of the Effects of Environmental Conditions and Fracturing Fluids on the Long-Term Conductivity of Proppants", paper SPE 16900, apresentado no 62<sup>th</sup> Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, ocorrido em Dallas, Texas, de 27 a 30 de setembro de 1987.



- [31] Saliba, C. A. M., Louvise, A. M. T., Silva, A. C., Maldonado, G. G. e Giorgi, P.:  
“Simulações Físicas de Dano à Formação ”, trabalho apresentado no 3º Seminário de  
Prevenção ao Dano de Formação , ocorrido em Natal, RN, de 19 a 23 de novembro  
de 1990.

## A TABELAS DE DADOS DE FILTRAÇÃO

Tempo (s)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Tempo (s)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Tempo (s)	Volume (cm <sup>3</sup> )
1,5	0,1	621,5	26	2302,1	55,1
4,6	0,3	717,8	28,6	2469,8	56,4
9,2	0,6	813,8	31	2649,7	57,8
22,9	1,5	922	33,7	2829,6	59
57,9	3,8	1029,5	36,2	3022,2	60,1
94	5,6	1149,8	38,7	3213,9	61
141,8	8,1	1269,7	41,2	3418	62
189,9	10,9	1401,6	43,7	3621,9	62,9
249,7	14	1533,5	46	3838	63,7
309,4	16,4	1678	48,2	4053,9	64,5
382,2	18,8	1821,8	50,1	4282	65,1
453,9	21,2	1978,1	51,9	4509,6	65,6
537,8	23,7	2133,8	53,6	4749,8	65,9

Tabela A.1: TV0708 - Filtrado acumulado x Tempo

Tempo (s)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Tempo (s)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Tempo (s)	Volume (cm <sup>3</sup> )
11,2	1,4	558,3	30,8	1815,3	58,4
35,5	4,1	615,6	32,4	1971,4	60,6
59,6	6,2	711,2	35,7	2127,4	62,7
95,9	7,8	807,1	38,6	2295,2	64,8
132,5	9,7	915	41,5	2463,1	66,6
179,7	12,9	1023,3	44,1	2643,5	68,6
227,9	15,9	1143,2	46,7	2823,3	70,6
286,3	19,1	1263,1	49	3015,4	72,9
350,2	22	1395,4	51,5	3207,3	74,8
422	25,2	1526,9	53,9	3411,2	76,7
493,3	28,2	1671,1	56,2		

Tabela A.2: TV0808 - Filtrado acumulado x Tempo

Tempo (s)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Tempo (s)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Tempo (s)	Volume (cm <sup>3</sup> )
4,2	0,6	568,1	31,5	2008,3	67,8
16	2,3	652,2	34,6	2164,7	69,9
28	3,8	748,2	38,1	2332,1	71,9
52,1	5,7	844,2	41,3	2500,4	73,7
87,9	8,2	952,1	44,8	2679,9	75,4
124	10,5	1060	48,1	2860,4	76,9
172,3	13	1180,2	51,4	3052,3	78,3
220,1	15,7	1300,2	54,4	3244	79,5
280,1	18,9	1432,3	57,6	3448	80,7
340,2	21,8	1564,1	60,3	3652,2	81,7
412,3	25,1	1708,3	63,1	3868,3	82,5
484,5	28,2	1852,5	65,4		

Tabela A.3: TV0908A - Filtrado acumulado x Tempo

Tempo (s)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Tempo (s)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Tempo (s)	Volume (cm <sup>3</sup> )
4	0,7	484,1	28,2	1708,1	39,1
16,1	2,8	567,8	30	1852	39,5
27,8	4,3	652	31,6	2008,1	39,9
52	7,2	747,8	33	2164,1	40,2
88,2	10,9	843,7	34,2	2331,9	40,6
123,8	13,8	952,1	35,2	2500,1	40,9
172,3	17,1	1059,9	36,1	2679,9	41,2
220,1	19,6	1180	36,9	2860,1	41,4
280,1	22,2	1300,2	37,5	3052	41,7
339,9	24,4	1432,1	38,1	3244,1	41,9
411,9	26,5	1563,8	38,6	3447,8	42,1

Tabela A.4: TV0908B - Filtrado acumulado x Tempo

Tempo (s)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Tempo (s)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Tempo (s)	Volume (cm <sup>3</sup> )
3,2	0,3	338,8	10,1	1178,9	13
15,1	1,4	411,4	10,7	1298,9	13,1
27,2	2,3	483,1	11,1	1431	13,3
51,2	3,8	567,3	11,5	1562,9	13,4
86,9	5,2	650,7	11,8	1707	13,6
123	6,4	747,1	12,1	1851	13,7
170,7	7,6	842,9	12,3	2007	13,8
219,4	8,6	951,1	12,6		
279,2	9,5	1058,9	12,8		

Tabela A.5: TV0908C - Filtrado acumulado x Tempo

Tempo (s)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Tempo (s)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Tempo (s)	Volume (cm <sup>3</sup> )
4,6	0,9	484,4	30,6	1708,5	45,3
16,8	3,3	568,8	32,8	1852,6	45,9
29,4	4,8	652,9	34,7	2008,6	46,5
52,8	7,5	748,6	36,5	2164,9	47,1
88,9	10,9	845	37,9	2332,6	47,6
124,5	13,7	952,8	39,4	2501,1	48,1
172,7	17	1060,7	40,6	2680,5	48,5
220,9	20	1181,1	41,8	2861,1	48,9
280,8	23	1300,8	42,9	3052,6	49,3
341,1	25,7	1432,8	43,8	3244,5	49,7
412,8	28,3	1564,8	44,6	3448,7	50

Tabela A.6: TV1008A - Filtrado acumulado x Tempo

Tempo (s)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Tempo (s)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Tempo (s)	Volume (cm <sup>3</sup> )
10	3,2	574,1	58,9	2013,4	78,7
22,3	7,1	658,1	61,9	2169,9	79
33,9	10,7	754	64,7	2337,8	79,4
57,7	16,7	850	66,4	2506,1	79,6
93,9	23,8	957,7	69,6	2686,6	79,7
129,8	29	1065,8	71,4	2865,8	79,8
177,8	34,9	1186,2	72,9	3058,1	80,4
226,3	39,9	1305,9	74	3249,2	81
285,9	45	1438,2	74,8	3454	81,2
345,8	49,3	1569,7	75,7		
418	52,9	1713,6	77,1		
489,9	55,9	1858,2	78,2		

Tabela A.7: TV1008B - Filtrado acumulado x Tempo

Tempo (s)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Tempo (s)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Tempo (s)	Volume (cm <sup>3</sup> )
6	0,1	654	2	2333,9	4,4
18	0,3	750,1	2,2	2501,9	4,6
30,1	0,5	846,1	2,3	2682,3	4,7
53,9	0,7	954,1	2,5	2862,1	4,9
90,5	0,8	1062,1	2,7	3053,6	5,1
126,6	1	1182,4	2,8	3246,4	5,3
174,2	1,1	1302,6	3	3450,2	5,4
222,4	1,2	1434,1	3,2	3654,1	5,6
281,8	1,4	1566,1	3,4	3870,4	5,8
342,1	1,5	1710,1	3,6	4086,4	6
414,1	1,6	1854,1	3,8	4314,4	6,1
486,2	1,8	2010	4		
570,1	1,9	2166,3	4,2		

Tabela A.8: TV1208 - Filtrado acumulado x Tempo

Tempo (s)	Volume ( $cm^3$ )	Tempo (s)	Volume ( $cm^3$ )	Tempo (s)	Volume ( $cm^3$ )
11,9	1	420,3	2,7	1439,9	4,3
23,7	1,5	492	2,9	1571,9	4,5
35,7	1,7	575,6	3	1716,1	4,6
59,5	1,8	660	3,1	1860	4,8
95,8	2	756,4	3,3	2015,8	4,9
131,6	2,1	851,7	3,4	2171,5	5,1
179,8	2,2	960,1	3,6	2339,9	5,2
228,1	2,4	1068,3	3,7	2508	5,4
287,7	2,5	1188,1	3,9	2687,6	5,6
348,1	2,6	1307,7	4,1		

Tabela A.9: TV1308B - Filtrado acumulado x Tempo

Tempo (s)	Volume ( $cm^3$ )	Tempo (s)	Volume ( $cm^3$ )	Tempo (s)	Volume ( $cm^3$ )
4	0,1	648,1	2,7	2328	4,8
12	0,3	743,8	2,9	2495,9	4,9
23,9	0,6	839,9	3	2676	5
48,2	0,9	947,9	3,2	2855,6	5,1
84,1	1,2	1055,8	3,3	3047,8	5,3
119,8	1,4	1176,1	3,5	3240	5,4
168,1	1,6	1295,8	3,6	3444,5	5,7
215,7	1,8	1428	3,8	3648	5,8
276,2	1,9	1560	3,9	3864,1	6
336	2,1	1703,9	4,2	4080,3	6,1
408,1	2,3	1847,8	4,3	4308	6,3
480,1	2,4	2003,8	4,5		
563,7	2,6	2160,1	4,6		

Tabela A.10: TV1408 - Filtrado acumulado x Tempo

Tempo (s)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Tempo (s)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Tempo (s)	Volume (cm <sup>3</sup> )
1,2	0,1	481,3	2,3	1705,3	4
13,5	1,1	565,6	2,3	1849,4	4,1
25,5	1,1	649,4	2,4	2004,8	4,3
49,4	1,4	745,2	2,6	2161,5	4,4
85,1	1,5	841,7	2,8	2329,2	4,7
121,3	1,6	949,2	2,9	2497,5	4,8
169,5	1,8	1057,7	3	2677,5	5,1
217,7	1,9	1177,1	3,2	2857,2	5,3
277,7	2	1297,3	3,4	3049,3	5,4
337,2	2,1	1429,5	3,6	3241,4	5,6
409,4	2,1	1561,2	3,8	3445,6	5,9

Tabela A.11: TV1508A - Filtrado acumulado x Tempo

Tempo (s)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Tempo (s)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Tempo (s)	Volume (cm <sup>3</sup> )
12,2	0,6	492,5	3,6	1716,2	9,7
23,9	0,9	576,6	4	1860,1	10,9
36,6	1	660,5	4,6	2016,4	11,6
60,1	1,2	756,4	6,3	2172,6	11,9
96,6	1,4	852,2	6,9	2340,4	12,2
132,2	1,6	959,9	7,3	2508,4	12,7
180,3	1,8	1068,2	7,6	2688,1	13,2
228	2	1188,4	7,9	2868,1	13,9
288,7	2,5	1307,9	8,5	3060,1	14,2
348,4	2,8	1440,2	8,9	3252,5	14,5
420,5	3,3	1572,2	9,3	3456,1	14,9

Tabela A.12: TV1508B - Filtrado acumulado x Tempo

Tempo (s)	Volume ( $cm^3$ )	Tempo (s)	Volume ( $cm^3$ )	Tempo (s)	Volume ( $cm^3$ )
5,9	0,1	653,7	1,6	2333,7	2,9
17,6	0,3	749,5	1,7	2501,8	3
29,8	0,4	846	1,8	2681,7	3
53,6	0,5	953,4	1,8	2861,6	3,1
89,6	0,7	1061,6	1,9	3053,2	3,2
125,8	0,8	1181,4	2	3245,4	3,3
173,4	0,9	1301,5	2,2	3449,4	3,5
221,2	1	1433,9	2,3	3653,6	3,6
281,6	1,1	1565,8	2,3	3869,7	3,6
341,5	1,2	1709,2	2,5	4085,4	3,7
413,6	1,3	1853,4	2,6	4313,7	3,8
485,8	1,4	2009,5	2,6		
569,4	1,5	2165,3	2,8		

Tabela A.13: TV1608 - Filtrado acumulado x Tempo

Tempo (s)	Volume ( $cm^3$ )	Tempo (s)	Volume ( $cm^3$ )	Tempo (s)	Volume ( $cm^3$ )
5,2	0,3	341,2	2,9	1181,2	4,4
17,4	1	413,4	3,4	1301,2	4,5
28,9	1,3	485,2	3,6	1432,9	4,6
53,2	1,8	569	3,6	1565,1	5
88,9	1,9	653,5	3,7	1709,3	5,1
125,2	2,2	748,8	3,9	1853,1	5,2
173,1	2,4	845,4	4	2009,1	5,3
221,2	2,7	952,9	4,1	2165,1	5,8
281,3	2,8	1061,3	4,2	2333,5	5,9

Tabela A.14: TV1808A - Filtrado acumulado x Tempo



Tempo (s)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Tempo (s)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Tempo (s)	Volume (cm <sup>3</sup> )
8	8,6	416,3	189,3	1436,4	428,4
20,3	21,7	488,6	210,2	1568,3	452,3
32,1	31	572,1	233,9	1712,3	476,6
56,5	49,1	656,3	256,9	1855,8	499,8
92,4	70,8	752,3	281,6	2012	524,5
128,3	87,9	848,3	305,2	2168,2	549,1
175,9	107,9	956,3	330,4	2336	574,5
224,4	126,2	1063,7	354	2504,4	598,8
283,9	147,3	1184,3	379	2684,6	622,9
344,3	166,8	1304,3	403,4		

Tabela A.15: TV1808B - Filtrado acumulado x Tempo

Tempo (s)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Tempo (s)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Tempo (s)	Volume (cm <sup>3</sup> )
5,9	0,4	486,2	2,6	1710	4
17,8	1,2	569,8	2,7	1853,9	4,1
29,8	1,3	654	2,8	2010,1	4,3
54,2	1,4	750,1	2,9	2166,1	4,4
90,1	1,5	845,8	3	2334,4	4,6
126,2	1,7	954,4	3,2	2502	4,8
173,9	1,7	1062,2	3,4	2681,9	5
222,1	1,9	1182,3	3,5	2862,2	5,2
282	2,1	1302,3	3,6	3054,2	5,4
342	2,3	1434,1	3,7	3246,2	5,5
413,7	2,5	1566,2	3,8	3450,1	5,8

Tabela A.16: TV1808C - Filtrado acumulado x Tempo

æ

## B TEORIA SIMPLIFICADA DA FILTRAÇÃO

### B.1 Lei de Darcy

Darcy [29] examinando o escoamento de água através de leitos de areia de variadas espessuras mostrou que a velocidade média  $v$ , tomada em relação à área total do leito  $A$ , era diretamente proporcional à diferença de energia específica  $h_1 - h_2$  e inversamente proporcional à espessura  $l$  do leito. A constante de proporcionalidade foi chamada de condutividade hidráulica,  $K$ .

A relação assim estabelecida ficou conhecida como Lei de Darcy.

$$v = K \frac{\Delta h}{l} \quad (\text{B.1})$$

onde

$$v = \left( \frac{1}{A} \right) \left( \frac{dV}{dt} \right) \quad (\text{B.2})$$

e

$$\Delta h = \Delta z + \frac{\Delta P}{\rho g} \quad (\text{B.3})$$

A equação proposta por Darcy é considerada válida para o escoamento laminar.

Da forma como foi definida, a condutividade hidráulica é dependente das propriedades do fluido bem como da estrutura do meio poroso. Em termos da permeabilidade do meio poroso  $k$  e da viscosidade do fluido  $\mu$ , a condutividade hidráulica é dada por

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} \quad (\text{B.4})$$

Substituindo na equação (B.1) o valor de  $K$  dado pela equação (B.4) e  $\Delta h$  dado pela equação (B.3) chegamos à forma usual da lei de Darcy para escoamento horizontal.

$$v = k \frac{\Delta P}{\mu l} \quad (\text{B.5})$$

## B.2 Equação Kozeny

Kozeny propôs uma equação para expressar a velocidade do escoamento através de um leito poroso em função da queda de pressão, da porosidade do meio e da área superficial específica das partículas, tendo em vista que estas quantidades podem ser facilmente determinadas.

O modelo adotado assume que o meio poroso consiste de uma série de canais tortuosos (fig. B.1), sujeitos a um escoamento laminar. Analogamente à equação de Poiseuille,

$$v' = \frac{d'^2}{k'\mu} \frac{\Delta P}{l'} \quad (\text{B.6})$$

onde:

$d'$  é o diâmetro equivalente dos canais do meio poroso

$k'$  é uma constante que depende da estrutura do meio poroso

$l'$  é o comprimento dos canais

$v'$  é a velocidade média nos canais.

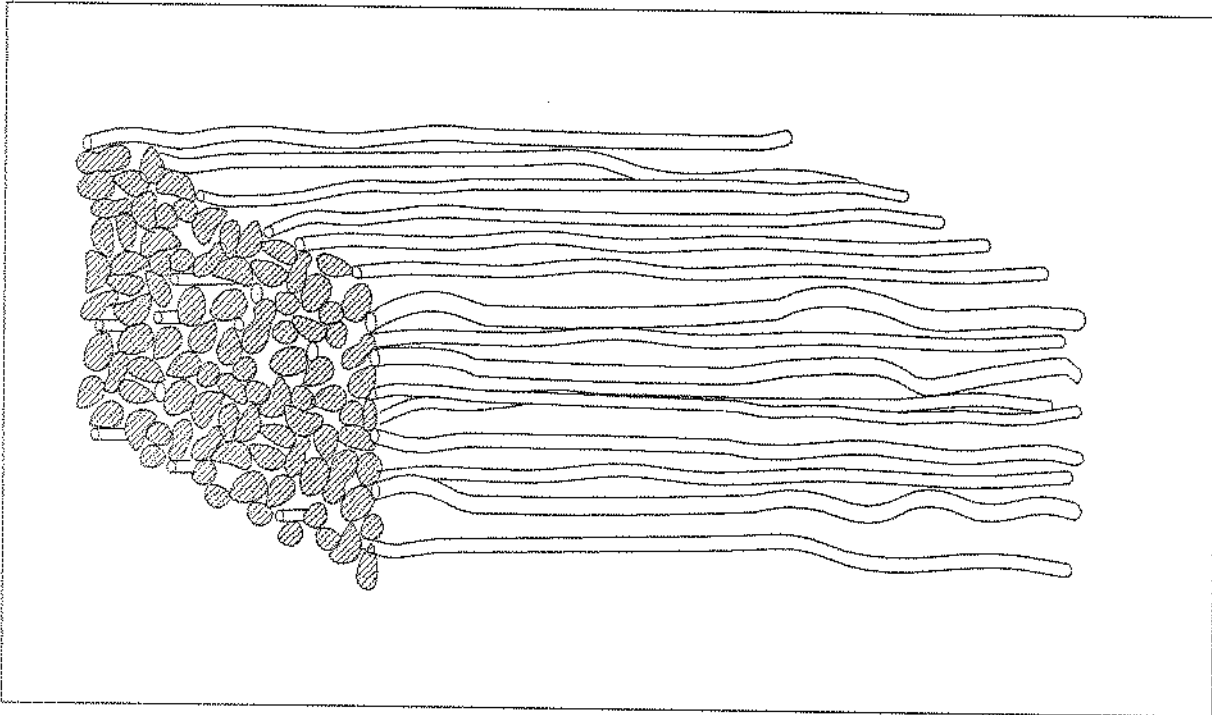


Figura B.1: Analogia com o escoamento em tubos

Kozeny, assumindo que o contato entre os grãos é puntual, estabeleceu uma expressão para  $d'$

$$d' = \frac{\phi}{S(1 - \phi)} \quad (\text{B.7})$$

onde  $S = A_p/V_p$  é a área superficial específica das partículas do meio poroso.

Tomando ainda,<sup>7</sup>

$$v' = \frac{v}{\phi} \quad (\text{B.8})$$

e assumindo que  $l'$  é proporcional a  $l$ , a equação (B.6) torna-se

<sup>7</sup>Esta aproximação proposta por Dupuit é melhor aplicada para empacotamentos aleatórios de partículas [19].

$$v = \frac{1}{k''} \frac{\phi^3}{S^2 (1 - \phi)^2} \frac{1}{\mu} \frac{\Delta P}{l} \quad (\text{B.9})$$

$k''$  é conhecida como constante de Kozeny. O seu valor para um empacotamento aleatório de partículas de forma e tamanho definidos é 4.167 [20]. Deve-se saber entretanto que  $k''$  depende da porosidade, forma da partícula e outros fatores [19]. Uma comparação com a expressão (B.5) mostra que a permeabilidade é dada por

$$k = \frac{1}{k''} \frac{\phi^3}{S^2 (1 - \phi)^2} \quad (\text{B.10})$$

A equação (B.9) que envolve  $\phi/S(1 - \phi)$  como medida do diâmetro efetivo do poro é recomendada para leitos de partículas pequenas quase esféricas. Com partículas grandes pouco esféricas, é melhor utilizar correlações experimentais [19].

### B.3 Filtração com formação de reboco

A separação de sólidos de uma suspensão em um líquido através de um meio poroso que retém os sólidos e permite a passagem do líquido é dita filtração (fig. B.2).

Em uma operação típica, o reboco se forma gradualmente a partir da face do meio filtrante aumentando progressivamente a resistência ao escoamento.

Os fatores mais importantes dos quais dependem a vazão de filtrado são:

- queda de pressão;
- área de filtração ;
- viscosidade do filtrado;
- resistência do reboco ao escoamento;
- resistência do meio filtrante ao escoamento.

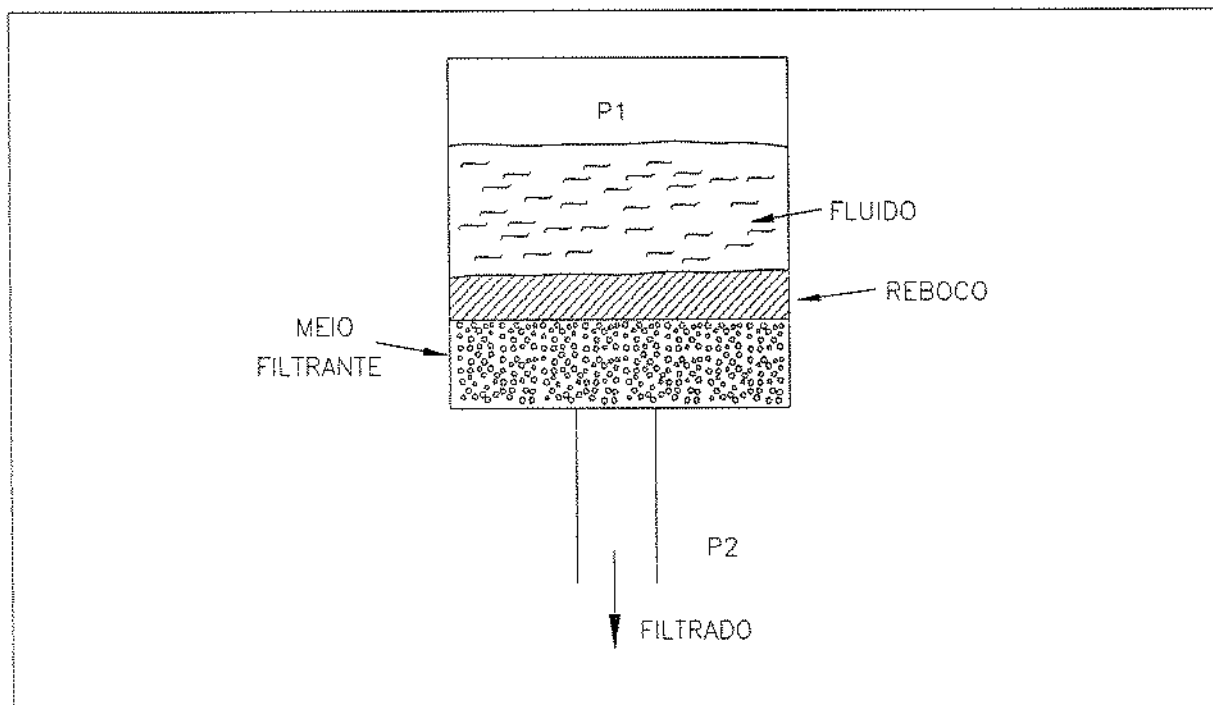


Figura B.2: Filtração com formação de reboco

### B.3.1 Resistência média específica do reboco

A equação de Kozeny (B.9) será empregada para descrever o escoamento de filtrado através do reboco, considerando que o regime é laminar. Deve-se notar entretanto que, em lugar de leito fixo, durante a filtração ocorre o crescimento da espessura do reboco.

O reboco formado durante a filtração pode ser classificado em dois tipos, incompressível e compressível. No primeiro caso a resistência ao escoamento não é afetada pela diferença de pressão ou pela variação da taxa de deposição de material. No segundo caso, um aumento do diferencial de pressão ou da vazão provoca a formação de um reboco mais denso com resistência maior.

No desenvolvimento da equação (B.9) foi assumido que o leito é uniforme e a porosidade é constante através dele. Na deposição do reboco é improvável que isto ocorra.

Como ponto de partida para o tratamento da queda de pressão através do reboco, vamos tomar a equação (B.9) rearranjada, na forma diferencial

$$\frac{dP}{dl} = \frac{k'' \mu v S^2 (1 - \phi)^2}{\phi^3} \quad (\text{B.11})$$

A figura B.3 mostra esquematicamente uma seção através do reboco e do meio filtrante em um tempo  $t$  contado do início da filtração .

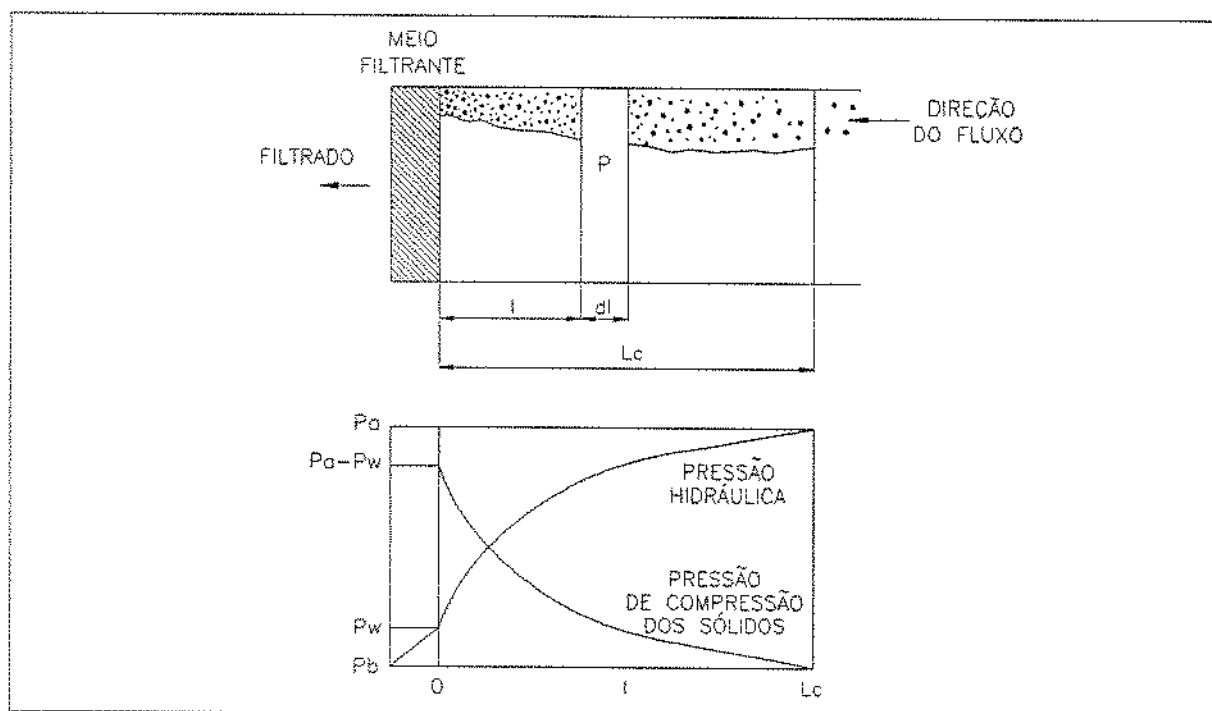


Figura B.3: Representação esquemática da filtração com formação de reboco

Considere uma camada de reboco de espessura  $dl$  e área  $A$ . O volume de sólidos na camada é  $A(1 - \phi) dl$  e se  $\rho_p$  é a massa específica das partículas, a massa de sólidos na camada é

$$dm = \rho_p (1 - \phi) A dl \quad (\text{B.12})$$

A eliminação de  $dl$  das equações (B.11) e (B.12) resulta em

$$dP = \frac{k'' \mu v S^2 (1 - \phi)}{\rho_p A \phi^3} dm \quad (\text{B.13})$$

Em alguns casos especiais de filtração de suspensões constituídas de partículas uniformes, rígidas, com diferencial de pressão moderado, o reboco pode ser assumido como incompressível e todos os fatores no lado direito da equação (B.13), constantes. A equação (B.13) integrada diretamente sobre toda a espessura do reboco fornece

$$P_a - P_w = \frac{k'' \mu v S^2 (1 - \phi)}{\rho_p A \phi^3} m_c \quad (\text{B.14})$$

onde

$m_c$  é a massa total de sólidos no reboco.

Em geral, nos casos mais comuns de filtração, o reboco formado não pode ser tomado como incompressível. O escoamento neste tipo de reboco faz com que ocorra uma variação na porosidade [21] de camada para camada, resultado da ação das forças viscosas que agem nas partículas (fig. B.4).

Desde que cada partícula começando da face externa do reboco, transmite a força de arrasto para a partícula a sua frente, as partículas mais próximas da face do filtro ficam mais comprimidas.

O arrasto acumulado em uma camada a uma distância  $l$  do meio filtrante, é proporcional a  $P_a - P$ . Admitindo que os parâmetros  $k''$ ,  $S$ ,  $\phi$  e  $\rho_p$  que aparecem na equação (B.13) dependem apenas de  $P_a - P$ , podemos então aglutinar estes parâmetros em uma única quantidade  $\alpha_l$  chamada resistência específica local do reboco

$$\alpha_l = \frac{k'' S^2 (1 - \phi)}{\rho_p \phi^3} \quad (\text{B.15})$$



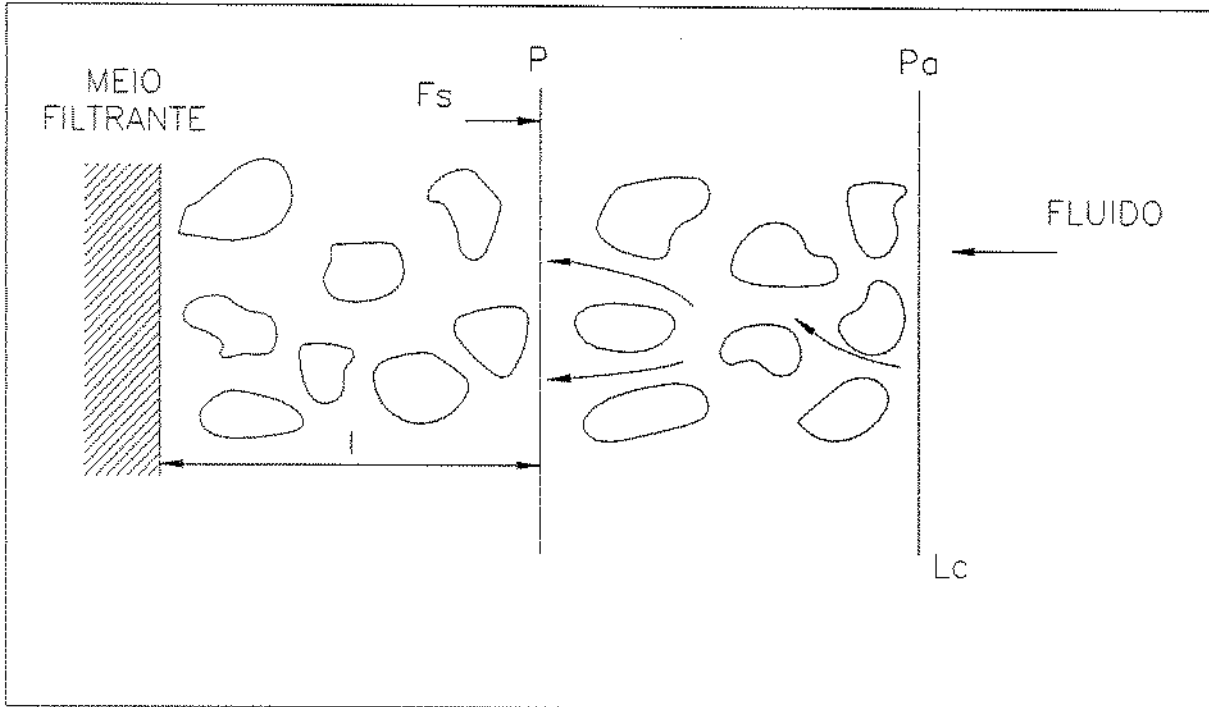


Figura B.4: Efeito das forças viscosas na porosidade do reboco

de modo que a equação (B.13) toma a seguinte forma

$$\frac{d(P_a - P)}{\alpha_l} = \frac{\mu v}{A} dm \quad (\text{B.16})$$

Definindo um coeficiente  $\alpha$  médio para todo o reboco dado pela equação

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{P_a - P_w} \int_0^{P_a - P_w} \frac{d(P_a - P)}{\alpha_l} \quad (\text{B.17})$$

obtemos, através da integração da equação (B.16), uma expressão para a queda de pressão no reboco

$$\frac{(P_a - P_w)}{\alpha} = \frac{\mu m_c v}{A} \quad (\text{B.18})$$

A equação (B.18) é a equação básica para a queda de pressão através do

reboco.

O coeficiente  $\alpha$  é a resistência média específica do reboco. Deve ser obtido experimentalmente e, para cada suspensão, depende apenas do diferencial de pressão.

### B.3.2 Resistência do meio filtrante

Uma resistência para o meio filtrante pode ser definida por analogia com a equação (B.18)

$$\frac{(P_w - P_b)}{R_m} = \mu v \quad (\text{B.19})$$

### B.3.3 Equação de trabalho

Combinando as equações (B.18) e (B.19) chegamos a

$$\Delta P = \mu v \left( \frac{m_c \alpha}{A} + R_m \right) \quad (\text{B.20})$$

onde  $\Delta P = P_a - P_b$

Para usar a equação (B.20) é conveniente colocar  $v$  e  $m_c$  em função do volume  $V$  de filtrado no tempo  $t$ .

Um balanço de massa fornece a relação entre  $m_c$  e  $V$ . Se  $c$  é a massa de sólidos depositada no filtro por unidade de volume de filtrado, então

$$m_c = Vc \quad (\text{B.21})$$

Substituindo  $v$  dado pela equação (B.2) e  $m_c$  dado pela equação (B.21), obtemos <sup>8</sup>

---

<sup>8</sup>Para suspensões diluídas podemos substituir  $c$  pela concentração de sólidos original na suspensão.

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\mu}{A\Delta P} \left( \frac{c\alpha V}{A} + R_m \right) \quad (\text{B.22})$$

### B.3.4 Filtração a pressão constante

A integração da equação (B.22), para  $\Delta P$  constante, fornece

$$t = \frac{\mu}{\Delta P} \left( \frac{c\alpha}{2} \left( \frac{V}{A} \right)^2 + R_m \frac{V}{A} \right) \quad (\text{B.23})$$

Para avaliar  $\alpha$ <sup>9</sup> e  $R_m$  a uma determinada pressão é necessário realizar um ensaio nessa mesma pressão ou utilizar alguma correlação adequada.

McCabe [20] mostra como relacionar  $\alpha$  e  $\Delta P$  a partir desta equação

$$\alpha = \alpha_0 (1 + \beta (\Delta P)^s) \quad (\text{B.24})$$

onde todos os parâmetros são constantes empíricas.

Destaca ainda que para alcançar resultados satisfatórios é melhor que esta equação seja utilizada em uma faixa de pressão não muito diferente daquela onde foram obtidos os dados experimentais.

---

<sup>9</sup>A resistência  $\alpha$  é uma função de  $P_a - P_w$ . Entretanto, considerando que  $P_w - P_i$  é pequeno quando o reboco é apreciável, podemos tomar  $\alpha$  como função de  $\Delta P$ .

## C COEFICIENTE DO FLUIDO DE FRATURAMENTO

### C.1 Modelo de Carter para filtração em uma fratura

A busca do aumento de produtividade dos poços de petróleo fez com que a tecnologia de fraturamento hidráulico se desenvolvesse no sentido de obter fraturas cada vez maiores. Para que esse objetivo fosse atingido de modo econômico, foi importante determinar como as propriedades dos fluidos de fraturamento influenciam o crescimento de uma fratura.

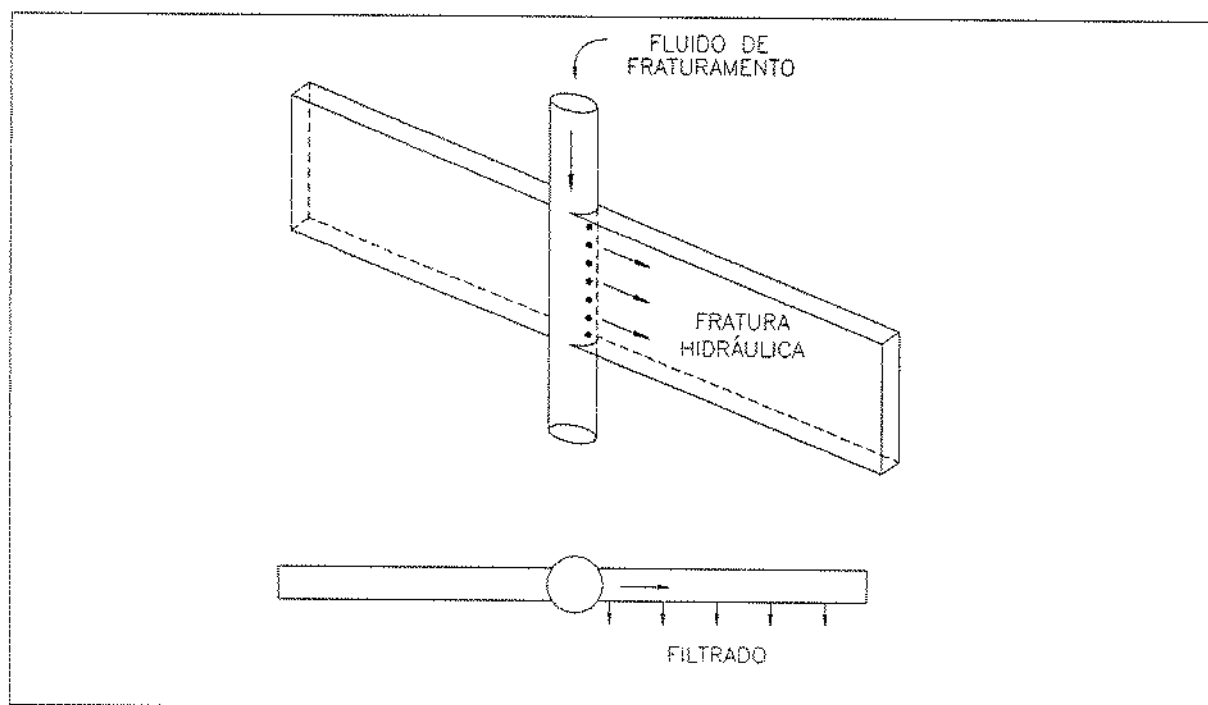


Figura C.1: Modelo de fratura proposto por Carter

R. D. Carter [1] propôs um modelo simples (fig. C.1) para o cálculo da extensão areal de uma fratura hidráulica, assumindo as seguintes hipóteses:

- A largura da fratura é uniforme;
- A direção do escoamento da fratura para a formação é perpendicular à face da fratura;
- A velocidade do escoamento em direção à formação em um ponto na fratura depende do tempo de exposição deste ponto ao escoamento;
- A função velocidade  $v(t)$  é a mesma para todo ponto na formação ;
- O tempo zero para cada ponto é dado pelo momento em que o fluido atinge aquele ponto;
- A pressão na fratura é constante e igual a pressão de bombeio do fluido no fundo.

Carter chegou à seguinte expressão para a taxa de injeção de fluido na formação :

$$i_L(t) = 2 \int_0^t v(t - \lambda) \frac{dA_{ff}}{d\lambda} d\lambda \quad (\text{C.1})$$

onde  $(t - \lambda)$  é o tempo de filtração para cada ponto e  $A_{ff}$  é a área de uma face da fratura.

A taxa com que o volume da fratura aumenta é dada por

$$Q_f(t) = W \frac{dA_{ff}}{dt} \quad (\text{C.2})$$

onde  $W$  é a largura da fratura.

A taxa de injeção de fluido é igual à soma da taxa de fluido perdido para a formação e da taxa de crescimento do volume da fratura.

$$i(t) = 2 \int_0^t v(t - \lambda) \frac{dA_{ff}}{d\lambda} d\lambda + W \frac{dA_{ff}}{dt} \quad (\text{C.3})$$

A equação (C.3) pode ser resolvida através da transformada de Laplace [27] uma vez que sejam definidas as formas de  $v(t)$  e  $i(t)$ .

Carter assumindo para a função  $v(t)$  e  $i(t)$  as expressões

$$v(t) = \frac{C}{\sqrt{t}} \quad (\text{C.4})$$

e

$$i(t) = \text{constante}$$

obteve a seguinte expressão para a área da fratura

$$A = \frac{iW}{4\pi C^2} \left( e^{x^2} \cdot \text{erfc}(x) + \frac{2}{\sqrt{\pi}} x - 1 \right) \quad (\text{C.5})$$

onde

$$x = \frac{2C\sqrt{\pi t}}{W}.$$

O coeficiente  $C$  é conhecido como coeficiente do fluido de fraturamento. Em um dado sistema de escoamento, este coeficiente depende das propriedades do fluido em uso e das características do fluido e da rocha do reservatório.

## C.2 Modelo de Howard e Fast

A perda de filtrado durante uma operação de fraturamento é função das resistências impostas ao escoamento do fluido para a formação (fig. C.2).

No modelo proposto por Howard e Fast [1], são três os mecanismos de controle da filtração associados a estas resistências: o primeiro, ditado pela viscosidade e a permeabilidade relativa ao filtrado, o segundo, devido à compressibilidade e viscosidade do fluido deslocado do reservatório e, por último, a formação do reboco nas faces da fratura.

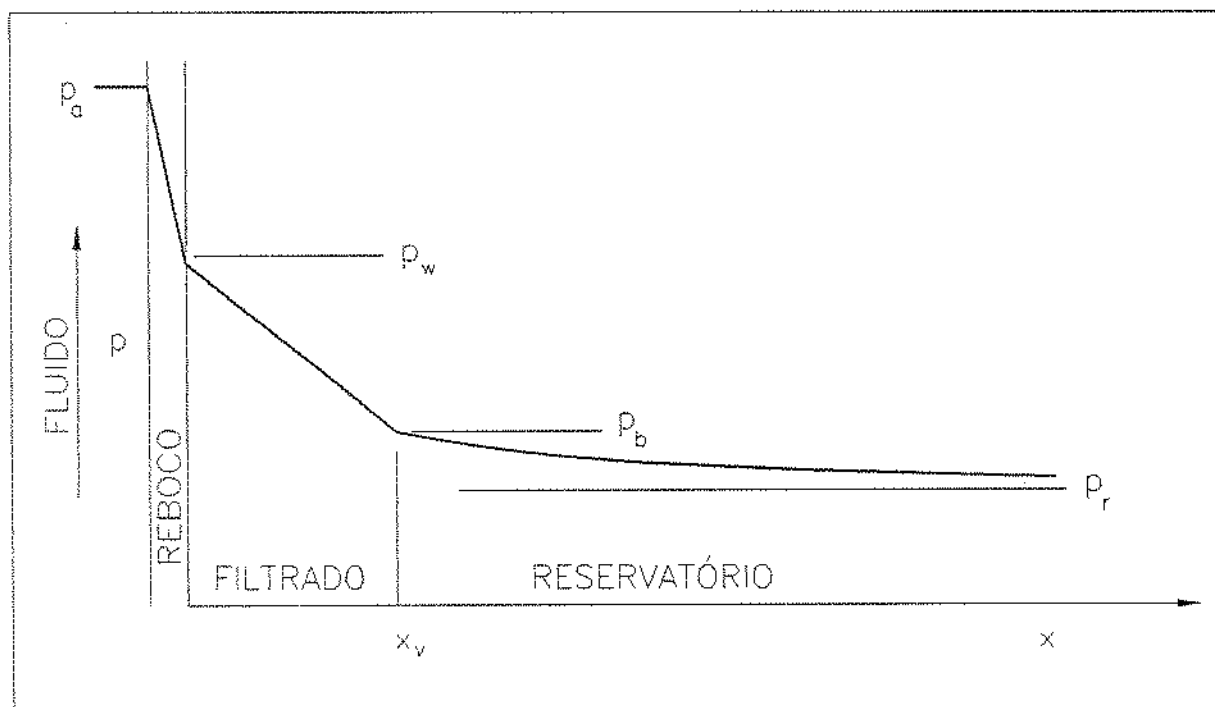


Figura C.2: Resistências ao escoamento do filtrado para a formação

Howard e Fast definiram os coeficientes de fluido de fraturamento  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  para representar cada um destes mecanismos separadamente. Embora na realidade estes mecanismos estejam agindo ao mesmo tempo, Howard e Fast sugeriram que para cada sistema de escoamento fosse utilizado no cálculo da área da fratura, o coeficiente que representasse o principal mecanismo de controle da filtração.

### C.2.1 Coeficiente de fluido de fraturamento viscoso

A definição deste coeficiente foi baseada em um modelo no qual um fluido newtoniano, viscoso, em regime laminar, invade um meio poroso previamente evacuado, sem formar reboco. A partir da lei de Darcy e tomando a velocidade de avanço da frente de fluido no meio poroso como dado por Dupuit [19] ( $v' = v/\phi$ ) chegamos a

$$v = \left( \frac{k\Delta P\phi}{2\mu t} \right)^{1/2} \quad (\text{C.6})$$

Comparando com a equação (C.4) proposta por Carter, o coeficiente  $C_1$  relativo à invasão do fluido de fraturamento viscoso é dado por

$$C_1 = \sqrt{\frac{k\Delta P\phi}{2\mu}} \quad (\text{C.7})$$

### C.2.2 Coeficiente do fluido do reservatório

O modelo utilizado para expressar este efeito assume:

- o fluido de fraturamento tem propriedades idênticas ao do fluido do reservatório;
- o reservatório tem comprimento infinito na direção do escoamento de filtrado;
- o reservatório se encontra pressurizado e a queda de pressão entre o fluido na fratura e o fluido na extremidade do reservatório é constante.

A equação da difusividade na forma linear aplicada a este modelo fornece uma expressão para velocidade de filtração na face da fratura [27].

$$v = \Delta P \sqrt{\frac{k\phi c_f}{\mu\pi t}} \quad (\text{C.8})$$

Assim o coeficiente  $C_2$  relativo à compressão do fluido do reservatório é dado por

$$C_2 = \Delta P \sqrt{\frac{k\phi c_f}{\mu\pi}} \quad (\text{C.9})$$



### C.2.3 Coeficiente de fluido de fraturamento formador de reboco

No caso de fluidos de fraturamento que utilizam uma solução polimérica em água, o reboco formado é um elemento importante no controle da filtração . A teoria simplificada de filtração aplicada ao reboco mostra que o volume de filtrado é proporcional à raiz quadrada do tempo.

Para alguns tipos de fluido e de meio filtrante, é verificada uma perda quase instantânea de fluido para o meio poroso. A equação que modela a filtração deste tipo de fluido portanto passa a ser

$$V = a\sqrt{t} + V_s \quad (\text{C.10})$$

onde  $a$  e  $V_s$  são obtidos experimentalmente.

Diferenciando a equação (C.10) em relação ao tempo e dividindo o resultado pela área de filtração  $A$ , é obtida uma expressão para a velocidade de filtração .

$$v = \frac{1}{2A} \frac{a}{\sqrt{t}} \quad (\text{C.11})$$

Por analogia com a equação (C.4) proposta por Carter, o coeficiente  $C_3$  relativo ao efeito do reboco é dado por

$$C_3 = \frac{a}{2A} \quad (\text{C.12})$$

## C.3 Coeficiente composto de Williams

Para representar o que ocorre com um fluido de fraturamento em condições de operação , quando atuam simultaneamente os três mecanismos de controle de filtração , foram propostos métodos para combinar os três coeficientes.

Williams [10] estabeleceu o método adotado atualmente.

Dado que o diferencial de pressão total é resultado da soma das quedas de pressão em cada zona (reboco, zona invadida, fluido do reservatório), somando-se o valor destas quedas individuais dadas pelas expressões da velocidade para cada tipo de mecanismo, assumindo que  $C_3$  é proporcional a  $\Delta P^{1/2}$ , chega-se a uma expressão do segundo grau para o produto da velocidade de filtração pela raiz do tempo,  $C$ , cuja solução é dada por

$$C = \frac{2C_1C_2C_3}{C_1C_3 + (C_3^2C_1^2 + 4C_2^2(C_1^2 + C_3^2))^{1/2}} \quad (\text{C.13})$$

## D INCERTEZA NOS PARÂMETROS DE FILTRAÇÃO

### D.1 Modelo de Poulsen

Os parâmetros de filtração  $\alpha_w$  e  $R_v$ , do modelo de Poulsen [17], são obtidos através de ajustes lineares tomados respectivamente nas curvas de  $V \times t^{1/2}$  e  $V \times t$ .

$$\alpha_w = \frac{C_a (V \times t^{1/2})}{2\sqrt{\Delta P}} \quad (\text{D.1})$$

$$R_v = \frac{\Delta P}{C_a (V \times t)} \quad (\text{D.2})$$

Conhecendo a incerteza na medida da pressão e nos coeficientes angulares, determina-se a incerteza nos parâmetros  $\alpha_w$  e  $R_v$ .

A incerteza do valor de uma grandeza  $R$ , função das variáveis  $u$  e  $v$ , é dada pela seguinte expressão [22]:

$$\sigma_R^2 = \left( \frac{\partial R}{\partial u} \sigma_u \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial v} \sigma_v \right)^2 \quad (\text{D.3})$$

Para um nível de probabilidade de 95,4%

$$U_R = \frac{2\sigma_R}{R}.$$

No caso dos parâmetros de Poulsen as expressões resultantes são as seguintes:

$$\left( \frac{\sigma_{\alpha_w}}{\alpha_w} \right)^2 = \left( \frac{\sigma_{C_a}}{C_a} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{\Delta P}}{2\Delta P} \right)^2 \quad (\text{D.4})$$

$$\left(\frac{\sigma_{R_v}}{R_v}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_{C_a}}{C_a}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\Delta P}}{\Delta P}\right)^2 \quad (D.5)$$

As tabelas D.1 e D.2 apresentam respectivamente a incerteza nos valores de  $\alpha_w$  e  $R_v$ , para um nível de confiabilidade de 95,4%, para os ensaios realizados com fluido reticulado.

Ensaio	$\Delta P$ (MPa)	$(U_{\Delta P})/2$ (%)	$C_a (v \times t^{1/2})$ (cm <sup>3</sup> /s <sup>0,5</sup> )	$U_{C_a}$ (%)	$\alpha_w$ (m/(Pa.s) <sup>0,5</sup> ).10 <sup>-8</sup>	$U_{\alpha_w}$ (%)
1208	3,4	1,02	0,1004	3,0	9,21	3,2
1308B	5,1	0,68	0,0854	2,9	6,39	3,0
1408	6,8	0,39	0,0884	1,1	5,74	1,2
1508A	5,2	0,67	0,0869	5,3	6,45	5,3
1508B	5,2	0,67	0,3091	3,6	22,9	3,6
1608	5,2	0,67	0,0556	1,7	4,15	1,8
1808A	5,2	0,67	0,0953	4,7	7,05	4,7
1808C	5,1	0,68	0,0819	2,9	6,12	3,0

Tabela D.1: Incerteza no cálculo de  $\alpha_w$

A incerteza na medida de  $\Delta P$  está associada ao erro de leitura no tubo em U estimado em 1mmHG ( $1,33 \cdot 10^{-4} MPa$ ), à resolução do transdutor de pressão ( $1,38 \cdot 10^{-2} MPa$ ) e ao ajuste linear pelo método dos mínimos quadrados ( $\sigma = 3,4 \cdot 10^{-2} MPa$ ) que definiu a equação de calibração do transdutor.

Os valores de incerteza obtidos para  $R_v$  mostram que a hipótese assumida no modelo de Poulsen, vazão de filtrado constante até a formação do reboco, compromete a descrição da filtração na sua fase inicial.

Ensaio	$\Delta P$ (MPa)	$U_{\Delta P}$ (%)	$C_a$ (V x t) (cm <sup>3</sup> /s)	$U_{C_a}$ (%)	$R_v$ (m/(Pa.s)).10 <sup>10</sup>	$U_{R_v}$ (%)
1208	3,4	2,04	0,0132	19,4	7,62	19,5
1308B	5,1	1,36	0,0472	45,6	3,20	45,6
1408	6,8	0,79	0,0251	0,02	7,99	0,79
1508A	5,2	1,33	0,0291	37,4	5,27	37,4
1508B	5,2	1,33	0,0377	36,3	4,07	36,3
1608	5,2	1,33	0,0171	0,00	8,92	1,33
1808A	5,2	1,33	0,0327	32,6	4,72	32,6
1808C	5,1	1,36	0,0673	0,04	2,26	1,36

Tabela D.2: Incerteza no cálculo de  $R_v$