

UFRRJ

**INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA
TECNOLOGIA QUÍMICA**

DISSERTAÇÃO

ESTUDO DA FILTRAÇÃO CRUZADA EM GEOMETRIA CILÍNDRICA

CRISTIANO AGENOR OLIVEIRA DE ARAÚJO

2010

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**ESTUDO DA FILTRAÇÃO CRUZADA EM GEOMETRIA
CILINDRICA**

CRISTIANO AGENOR OLIVEIRA DE ARAÚJO

Sob a Orientação de
Cláudia Miriam Scheid

Dissertação submetida como
requisito parcial para a obtenção
do grau de **Mestre em Ciências**
em Engenharia Química, Área de
Concentração em Tecnologia
Química.

Seropédica, RJ
Fevereiro de 2010

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

CRISTIANO AGENOR OLIVEIRA DE ARAÚJO

Dissertação submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, área de Concentração em Tecnologia Química.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 09 / 02 / 2010

Cláudia Miriam Scheid, D. Sc., DEQ/UFRRJ
(Orientador)

Maurício Cordeiro Mancini, D.Sc., DEQ/UFRRJ

Nehemias Curvelo Pereira, D.Sc., DEQ/CT/UEM

DEDICATÓRIA

Esta dissertação é dedicada à minha irmã Cátia Cristina Oliveira de Araújo que nos deixou pouco tempo atrás. Deus me deu o privilégio de convivermos sempre unidos por 29 anos. A saudade que eu, minha mãe e meu pai sentimos não há como medir e muito menos mudar. Minha casa está vazia! Este é o sentimento de nós familiares. Ela alegrava a nossa casa com seu brilho e seu sorriso. Muitas das vezes não havia do que sorrir, mas só hoje eu entendo o motivo de tanta alegria. Ela me mostrou o verdadeiro significado de ser humano, sem ter vergonha do que somos e do que fazemos, me ajudou a entender que os bens materiais de fato não somam em nossa alma e nem fazem sentido aos que da bondade vivem. Hoje eu entendo porque ela fazia tudo tão rápido. Era um furacão! Queria ter participado mais. Queria poder ter feito mais. Em toda a nossa vida nunca sentimos a ausência de Deus, ou de algo que sempre nos apoiou com muita força, mas está difícil de compreender tudo isto. Tenho certeza que não foi desta vez que ele(-s) nos abandonou(-aram). Tenho plena convicção que iremos nos encontrar e, juntos, faremos a maior festa que jamais será desmembrada da minha memória. Fique com Deus minha linda! Eu te amo muito e sempre te amarei. Até breve.

Dedico também esta dissertação a meu pai José Agenor de Araújo e a minha mãe Maria do Carmo Oliveira. Muito obrigado por tudo que já puderam me proporcionar e tenham muita fé, meus queridos Pais, pois o encontro com nossa querida Cátia será em breve. Amo vocês!

AGRADECIMENTOS

A minha irmã Cátia Cristina Oliveira de Araújo e meus pais José Agenor de Araújo e Maria do Carmo Oliveira pelo apoio incondicional não só nesta dissertação, mas em toda a minha vida.

A toda a minha família por me apoiar em meus sonhos principalmente os meus irmãos Paulo e Clóvis, e minha cunhada Valéria.

A minha orientadora Cláudia Miriam Scheid por todo o carinho e pela excelente orientação.

Aos professores do departamento de engenharia química por todo apoio, carinho e ajuda durante esta dissertação.

A meu grande amigo Álvaro Luiz Marinho Castro por ter acreditado no meu sonho, me tornando uma pessoa melhor.

A meus amigos que sempre foram presentes em minha vida: Pedro Paulo, Daniel Chalita, Ewerton, Olavo, Carol, Helma,...

A todos da minha turma 2001/II: Cláudia, Tati, Roberta, Cinthya, Livia, Morto, Gigi... vocês são fantásticos!

A todos do mestrado 2007/I: Cris, Adriana, Agustinho, Rômulo (o homem da saga! Hahaha...), Cocô, Stick, Cavalo.

A meu amigo Sérgio (butterfly, 5S, tanque, chupa-cabra,...hahahah) pelo companheirismo ao longo de toda esta dissertação. Sou grato por todos os ensinamentos e também pelos momentos de discussão filosófica que juntos passamos.

A Deus pela presença em nossas vidas!

RESUMO

ARAÚJO, Cristiano Agenor Oliveira. **Estudo da Filtração Cruzada em Geometria Cilíndrica**. 2010 103p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química, Tecnologia Química). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2010.

Na perfuração e completção de poços de petróleo, o fluido de perfuração ao escoar pela região anular invade a formação levando ao crescimento de uma torta na parede do poço, podendo comprometer a avaliação do reservatório, durante a testemunhagem, e causar danos irreversíveis ao mesmo. O processo que governa a invasão do fluido de perfuração na formação rochosa é o mesmo que prevalece na filtração estática, quando o fluido pára de circular, e dinâmica, quando o fluido escoar através do poço. O controle da filtração no processo de perfuração de poços de petróleo tem sido alvo de estudo em função do seu impacto nos custos das operações de produção de poços. Neste trabalho, serão apresentados resultados experimentais e simulados obtidos em diferentes condições de filtração buscando comparar e conhecer os mecanismos que controlam a filtração, tanto, em condições estáticas, quanto dinâmica. Três unidades de filtração foram construídas, uma dinâmica, filtração cruzada e outras duas estática, filtro folha e filtro sob pressão, para avaliação dos parâmetros da filtração como resistividade média da torta, resistência do meio filtrante, porosidade, tempo de filtração e volume de filtrado. Estes parâmetros também foram determinados em filtro HTHP (Fann Instruments), que é um equipamento comumente utilizado na indústria de petróleo para o estudo da filtração estática. Os resultados obtidos mostram que não é possível prever os valores de resistividade da torta para a filtração dinâmica a partir de testes estáticos. Foi observado também que a estrutura da torta formada depende de cada modo de filtração. Para a filtração cruzada foram feitas simulações dos experimentos apresentados utilizando a equação proposta por Ferreira & Massarani (2005). As condições experimentais para cada experimento foram usadas para gerar essas simulações. Foi possível prever o comportamento da filtração dinâmica a partir das simulações.

Palavras chave: filtração cruzada, perfuração, formação rochosa.

ABSTRACT

ARAÚJO, Cristiano Agenor Oliveira. Study of the Crossflow Filtration in Cylindrical Geometry. 2010 103p. Dissertation. (Master Science in Chemical Engineering, Chemical Technology). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica , RJ, 2010.

In the drilling and completion of oil wells, the drilling fluid while draining out annular region invades the formation leading to the growth of a cake on the wall of the well, potentially compromising the evaluation of the reservoir during the testimonial phase, and causes irreversible damage to it. The process that drives the invasion of drilling fluid in the rock formation is the same that prevails in static filtration, when the fluid stops to circulate, and dynamic filtration, when the fluid flows through the well. The control of filtration in the process of drilling for oil has been studied in terms of its impact on costs of production operations of wells. In this work will be presented simulated and experimental results obtained under different condition of filtration, trying to compare and learn about the mechanisms that control filtration, both under static and dynamics conditions. Three filtration units were built, a dynamic, crossflow filtration and two static filter, leaf test and under pressure, to evaluate the parameters of the filtration: the average resistivity of the cake, the filter medium resistance, porosity, filtration time and filtrate volume. These parameters were also determined in HTHP filter (Fann Instruments), which is a device commonly used in the petroleum industry for the study of static filtering. The results show that is not possible to predict the values of cake resistivity for the dynamics filtration from static tests. It was also observed that the structure of cake formed depends on the mode of filtration. For crossflow filtration were made simulations of experiments using the equation proposed by Ferreira & Massarani (2005). The experimental conditions of each experiment were used to generate these simulations. It was possible to predict the behavior of the dynamic filtration from the simulations.

Keywords: crossflow filtration, drilling, rock formation.

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO.....	1
2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1- Definição.....	4
2.2- Aplicações.....	4
2.3- Formação da torta	4
2.4- Fluxo de filtrado.....	5
2.5- Meio poroso	5
2.6- Particulado	6
2.7 Equações da continuidade e do movimento	6
2.8 A teoria simplificada da filtração	7
2.8.1. Filtração com formação de torta incompressível.....	7
2.8.2 Filtração com formação de torta compressível.....	10
2.9 Modelagem físico-matemática para a filtração cruzada com fluido Newtoniano. 12	
3 - MATERIAIS E MÉTODOS	17
3.1 A unidade piloto para a filtração cruzada.....	17
3.2 Unidade de bancada para o filtro folha	20
3.3 Unidade experimental para a filtração sob pressão.....	21
3.4 Equipamento de filtração HTHP	23
3.5 Medidas de concentração e vazão	23
3.6 Determinação da porosidade	24
3.7 Material particulado	25
3.8 Os meios filtrantes.....	25
3.9 Procedimento experimental.....	26
4- RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
4.1 Meio poroso utilizado.....	28
4.2 Curvas de filtração	29
4.3 Avaliação experimental dos parâmetros α e R_m	32
4.4 Resultados da simulação	35
5 – CONCLUSÃO.....	38
6- SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	39
7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	40
8- ANEXOS.....	45
ANEXO 1 – Dados experimentais coletados nas unidades experimentais	45
ANEXO 2 – Trabalhos publicados durante a dissertação	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de α para os dois modos de filtração usando o filtro HTHP e as unidades construídas..... 32

Tabela 2: Valores de R_m para os dois modos de filtração usando o filtro HTHP e as unidades construídas..... 33

Tabela 3: Valores de porosidades para a filtração cruzada, filtro sob pressão e folha.. 35

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização das refinarias e um breve histórico da produção nacional.....	1
Figura 2: Região anular onde ocorre a filtração cruzada.....	2
Figura 3: O processo da filtração cruzada.	3
Figura 4: Filtração plana.....	7
Figura 5: Filtração radial (Massarani, 1985).	9
Figura 6: Filtrações plana e radial (Massarani, 1985).	10
Figura 7: Desempenho do filtro COPPE: suspensão aquosa de talco (5% em peso), área filtrante 670 cm ² (Massarani, 1985).	12
Figura 8: Diagrama do mecanismo de escoamento (Ferreira & Massarani, 2005).	13
Figura 9: Resultados experimentais para a filtração cruzada. (Ferreira & Massarani, 2005). ♦ Exp 3- $(\Delta P)_f = 0,8$ atm, $c = 0,022$ p/p; ● Exp 6- $(\Delta P)_f = 2,2$ atm, $c = 0,033$ p/p; ■ Exp 9- $(\Delta P)_f = 1,0$ atm, $c = 0,030$ p/p; ▲ Exp 11- $(\Delta P)_f = 0,5$ atm, $c = 0,032$ p/p; — ajuste da equação (44) com $n = 2$	16
Figura 10: Esquema representativo da unidade piloto.....	17
Figura 11: Foto da unidade experimental equipada para a filtração.....	18
Figura 12: Vista lateral da unidade.....	18
Figura 13: Tanque agitado com suspensão.....	19
Figura 14: Medidores de pressão diferencial (SMAR).....	19
Figura 15: Esquema da unidade de bancada do filtro folha.	20
Figura 16: Foto da unidade de bancada do filtro folha.....	21
Figura 17: Unidade experimental para a filtração plana sob pressão.	22
Figura 18: Foto da unidade experimental para a filtração plana sob pressão.....	22
Figura 19: Aparato experimental utilizado para a filtração plana, filtro HTHP.....	23
Figura 20: Fôrmãs contendo carbonato de cálcio remanescente após secagem.....	24
Figura 21: Distribuição do tamanho das partículas para o carbonato de cálcio.	25
Figura 22: Meio poroso sinterizado de aço inox.	25
Figura 23: Meio poroso em polipropileno e detalhe da tomada de pressão.	26
Figura 24: Meio poroso composto por tecido de filtração.....	26

Figura 25: Esquema da malha experimental com os números dos respectivos experimentos realizados.	28
Figura 26: Comparação entre os tempos de estabilização do diferencial de pressão para os dois filtros.	29
Figura 27: Gráfico dos resultados experimentais para a filtração cruzada.....	30
Figura 28: Gráfico dos resultados experimentais para a filtração em filtro folha.	30
Figura 29: Gráfico dos resultados experimentais para a filtração sob pressão.....	31
Figura 30: Gráfico dos resultados experimentais para a filtração HTHP.....	31
Figura 31: Imagem da torta formada na filtração cruzada a uma pressão de 2 kgf/cm ² . 34	
Figura 32: Imagem da torta formada na filtração sob pressão, filtro folha e HTHP.....	34
Figura 33: Resultados típicos da comparação entre os dados de simulação e experimentais da filtração dinâmica.	36
Figura 34: Análise de sensibilidade paramétrica em relação à resistividade da torta de filtração. (Experimento 1).....	37

LISTA DE ABREVIATÖES DE SÍMBOLOS

A	área de filtração;
c	concentração da suspensão;
n	número de pontos da série;
R _m	resistência do meio filtrante;
r _t	raio do tubo;
t	tempo de filtração;
V	volume de filtrado;
v	volume de filtrado por área de filtração;
v _F	velocidade intersticial da fase fluida;
v _S	velocidade intersticial da fase sólida;
ΔP _f	diferencial de pressão;
g	intensidade do campo exterior;
T _S	tensão exercida sobre a fase sólida;
F _S	gradiente de deformação;
m	força resistiva que o fluido exerce sobre a fase sólida;
q ₁	velocidade superficial do fluido;
p _S	pressão que atua sobre a matriz porosa;
HTHP	high temperature high pressure filter;

Letras gregas:

α	resistividade;
ε	porosidade;
μ _F	viscosidade do fluido;
ρ _S	densidade do sólido;
ρ _F	densidade do fluido;

Sub-índices:

F	fluido;
S	sólido;
t	torta.

1 – INTRODUÇÃO

O completo domínio da tecnologia de exploração de petróleo é sem dúvida um objetivo claro a ser seguido pelas grandes corporações petrolíferas. Em um mundo globalizado e competitivo, a otimização de tal processo é uma busca incessante que tem como objetivo maior lucratividade e competitividade. O panorama nacional é bastante promissor, com recentes descobertas de grandes reservas de petróleo, o Brasil pode ascender na competitividade mundial, afinal energia é o que move um país e a exploração de petróleo é o ícone da energia mundial. A Figura 1 resume o panorama citado.

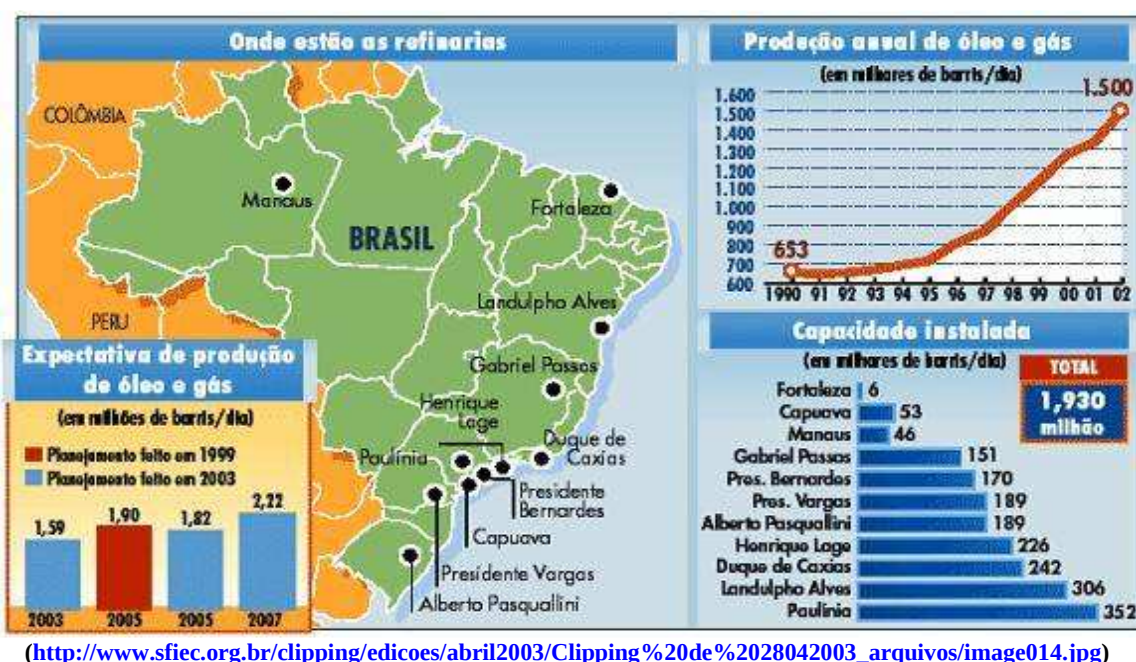


Figura 1: Localização das refinarias e um breve histórico da produção nacional.

A filtração está presente no processo de perfuração de poços de petróleo (Peden et al., 1984; Outmans, 1963, citado por Jiao & Sharma, 1994; Jiao & Sharma, 1992, citado por Jiao & Sharma, 1994; Ershaghi & Azari, 1980). O fluido de perfuração é injetado pelo interior da coluna de perfuração e retorna a superfície pelo espaço anular existente entre a coluna de perfuração e a formação rochosa. Sendo a formação rochosa um meio poroso, há uma tendência desse fluido permear para o interior dessa formação. Esta invasão de fluido de perfuração na formação rochosa é uma ação indesejada, podendo comprometer a amostragem e, conseqüentemente, a avaliação do óleo (Bourgoyne et al., 1991, citado por Scheid et al.).

Dois modos de filtração estão presentes no processo de perfuração. Enquanto as brocas estão perfurando, o modo de filtração presente é a dinâmica (ou cruzada). Quando há a necessidade de uma parada no bombeamento de fluido, o modo de filtração que prevalece é a estática (ou plana). O entendimento dos processos de filtração do fluido de perfuração e sua influência nos mecanismos de formação do reboco e dano à formação tem atraído interesse contínuo na engenharia de petróleo. O

controle da filtração tem um considerável impacto nos custos das operações de perfuração e na produtividade do poço (Waldmann et al., 2006).

A filtração cruzada resulta do escoamento axial de uma suspensão através de um duto, na qual as paredes são constituídas de um material filtrante, conduzindo a formação de um depósito sobre a superfície e a produção de um filtrado que percola através da mesma. A operação de preparação e perfuração dos poços de óleos envolve essencialmente o mesmo fenômeno que prevalece na filtração cruzada, é o escoamento axial de uma suspensão não-Newtoniana no espaço anular entre a coluna de perfuração e a formação do petróleo. Nessa situação, as propriedades e a espessura do depósito que é formado permitem o controle da invasão danificante do fluido de perfuração na formação do petróleo (Ferreira & Massarani, 2005).

A Figura 2 mostra onde o processo ocorre na região anular entre a parede da formação rochosa que, nesse caso, é o meio poroso utilizado na unidade experimental deste trabalho, e a parede externa da coluna de perfuração.

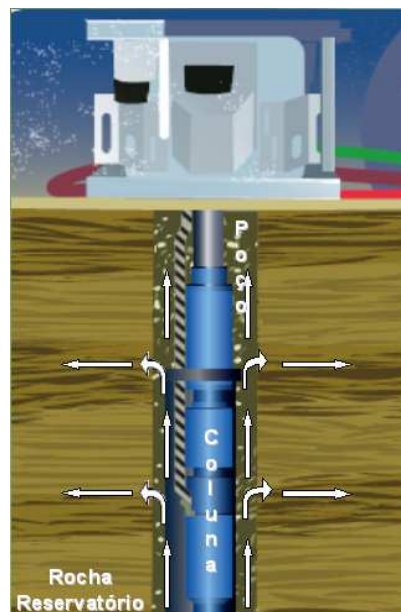


Figura 2: Região anular onde ocorre a filtração cruzada.

A filtração cruzada ocorre com formação de torta nas paredes do meio poroso, com escoamento nas direções axial e radial, sendo que a filtração ocorre na direção radial como mostra a Figura 3.

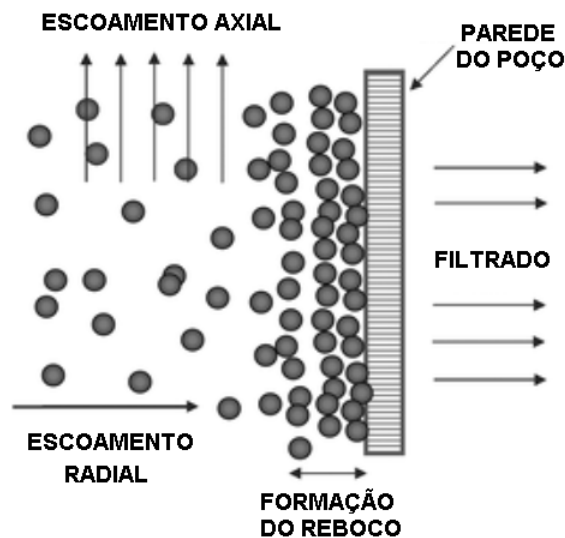


Figura 3: O processo da filtração cruzada.

O ponto chave do estudo é o conhecimento quantitativo do fenômeno envolvido na filtração plana e cruzada para a proposta de condições operacionais ótimas, visando minimizar a invasão de fluido na formação rochosa, o que pode danificar irreversivelmente o poço em questão. O conhecimento de novas técnicas operacionais que possam proporcionar mais segurança, agilidade e produtividade ao processo, é de extrema importância para o desenvolvimento da tecnologia de perfuração. Portanto, este trabalho dispõe-se a avaliar as unidades experimentais construídas para filtração plana e cruzada, os meios filtrantes a serem utilizados na mesma e os resultados provenientes dos diversos experimentos realizados nesta unidade. A avaliação consiste na coleta de dados experimentais como volume de filtrado, tempo de filtração, pressão de filtração e concentração da suspensão.

2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1- Definição

O processo da filtração cruzada difere da filtração convencional por apresentar um escoamento tangencial à superfície de filtração (Nunes da Silva & Flausino, 2008).

Lu & Ju (1989, citado por Connell et al., 1999) afirmaram que a filtração cruzada refere-se ao modo de separação sólido-líquido onde a corrente de alimentação escoia tangencialmente através da membrana. Como o líquido permeia o meio, uma porção das partículas, associadas com a corrente que permeia, deposita-se na superfície do meio para formar uma torta sólida. Visto que o crescimento da torta é limitado pela tensão de cisalhamento atuando sobre a superfície do meio poroso, a filtração cruzada tem a vantagem de uma deposição de torta mais fina, fluxo de filtração mais alto, e um modo de operação contínuo. Segundo Ruiz (1994, citado por Nunes da Silva & Flauzino, 2008), na filtração cruzada, a circulação do fluido a ser filtrado ocorre tangencialmente à área de filtração, visto que na filtração convencional, a pressão conduz o fluido perpendicularmente ao elemento de filtração. Essa característica construtiva permite a corrente de alimentação remover partículas incrustadas sobre a superfície de filtração e também contribuir para a eficiência do processo.

2.2- Aplicações

A filtração cruzada é encontrada em várias aplicações de engenharia, como a separação sólido-líquido (Jiao & Sharma, 1994), purificação de água (Jiao & Sharma, 1994; Wu et al., 1990, citado por Nunes da Silva & Flauzino, 2008; Carneiro et al., 2002, citado por Nunes da Silva & Flauzino, 2008), na indústria para a clarificação de efluentes (Ripperger & Altamann, 2002), processamento de alimentos (Jiao & Sharma, 1994) e operações de perfuração (Jiao & Sharma, 1994; Ripperger & Altamann, 2002, citado por Ferreira & Massarani, 2005). Devido a essas características intrínsecas, a filtração cruzada tem sido usada para resolver diversos tipos de problemas industriais que envolvem separação. Especialmente em bio-indústrias, a filtração cruzada é utilizada para esterilização de soluções em baixa temperatura (Dornier et al., 1993, citado por Nunes da Silva & Flauzino, 2008; Hafidi et al., 2005, citado por Nunes da Silva & Flauzino, 2008) e remoção de macromoléculas em soluções (Roseiro et al., 1993, citado por Nunes da Silva & Flauzino, 2008; Choi et al., 2005, citado por Nunes da Silva & Flauzino, 2008). Para Nunes da Silva & Flausino (2008), outra característica intrínseca da filtração cruzada é que tanto a fase sólida quanto a líquida podem ser recuperadas. A filtração cruzada também é empregada na indústria em uma larga faixa de aplicações que empregam a tecnologia de membranas (Massarani, 1985; Ripperger & Altamann, 2002, citado por Ferreira & Massarani, 2005).

2.3- Formação da torta

Para Massarani (1985) as propriedades da torta dependem de inúmeros fatores de difícil quantificação, como da físico-química da suspensão sólido-fluido, da colmatação causada pela migração das partículas de pequenas dimensões através da torta e da história do processo deformatório imposta pelo escoamento do fluido sobre a

matriz sólida, o que significa que a configuração e as condições de operação do filtro afetam as características da torta nele produzida.

O equilíbrio da espessura da torta, de acordo com Jiao & Sharma (1994), é alcançado quando nenhuma partícula pequena o suficiente para ser depositada está disponível na suspensão. Bezemer & Havenaar (1966, citado por Jiao & Sharma, 1994), a partir de dados experimentais, mostraram que o equilíbrio da taxa de filtrado é diretamente proporcional a tensão cisalhante na superfície da torta. Para O'neil (1968, citado por Jiao & Sharma, 1994), a espessura de equilíbrio da torta é alcançada quando as forças atuando para reter as partículas sobre a superfície são sobrepostas pelas forças de cisalhamento hidrodinâmicas, no qual as partículas tendem a entrar no fluxo da corrente. Há quatro forças atuando sobre cada partícula: uma força tangencial hidrodinâmica (tensão de cisalhamento) na qual é gerada pelo escoamento da suspensão; uma força normal de arrasto a qual é gerada pelo fluxo de filtrado; uma força de elevação hidrodinâmica; e forças de superfície. A força de elevação sobre uma partícula situada sobre uma superfície plana em escoamento laminar é desprezível. Outmans (1963, citado por Jiao & Sharma, 1994) propôs que a adesão e o desprendimento de partículas da superfície da torta dependem do coeficiente de atrito entre as partículas e a superfície da torta. Visser (1972, citado por Jiao & Sharma, 1994) assume que a força tangencial requerida para remover uma partícula de uma superfície plana é proporcional a força de arraste.

2.4- Fluxo de filtrado

A filtração com formação de torta constitui-se num problema de mecânica dos fluidos no qual o fluido escoar através de um meio poroso, a torta, que cresce e se deforma continuamente. Caracteristicamente, o escoamento do filtrado com o tempo pode estabilizar, em uma operação longa, como consequência da ação do mecanismo que limita a formação da torta (Massarani, 1985). Fordham et al. (1988, 1989, 1992, citado por Jiao & Sharma, 1993) observaram de seus resultados experimentais que no início da filtração, o volume de filtrado aumenta com a raiz quadrada do tempo e mais tarde a taxa é constante e aumenta linearmente com o tempo. Bezemer et al. (1966, citado por Jiao & Sharma, 1994) e Ferguson (1954, citado por Jiao & Sharma, 1994) observaram experimentalmente a relação linear entre a taxa de cisalhamento da superfície da torta e a do equilíbrio da taxa de filtração. Eles também descobriram que um aumento na pressão de filtração não tem efeito sobre o equilíbrio da taxa de filtração porque a permeabilidade da torta decresce com o aumento da pressão de filtração.

2.5- Meio poroso

Para Nunes da Silva & Flausino (2008) os filtros empregados na filtração cruzada geralmente apresentam poros com diâmetros inferiores aos das partículas do sólido em suspensão no fluido. Essas partículas são retidas na superfície da membrana e depois arrastadas pelo movimento do fluido a ser filtrado. A resistência que a membrana fornece ao escoamento fica constante porque as partículas depositadas sobre a membrana são continuamente arrastadas.

2.6- Particulado

Connel et al (1998) descobriram que o formato da partícula influencia o equilíbrio do fluxo pela estrutura da camada da torta formada. Partículas de formatos irregulares como partículas de carbonos ramificados proporcionam altos fluxos devido a espaços existentes entre as partículas que estão acumuladas juntas. Partículas de formatos mais regulares como esferas de vidro resultam em fluxos mais baixos.

2.7 Equações da continuidade e do movimento

As operações de filtração e espessamento de suspensões levam à formação de tortas e de sedimentos que se caracterizam por exibirem uma variação de porosidade ao longo de sua estrutura, causada pela percolação de fluido.

A formulação para a fluidodinâmica em meios deformáveis pode ser estabelecida a partir das equações da continuidade e do movimento para cada fase e mais as equações constitutivas do sistema (Silva Telles & Massarani, 1989; Massarani et al., 1993):

Equações da continuidade:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon \rho_F) + \text{div}(\varepsilon \rho_F \mathbf{v}_F) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}[(1 - \varepsilon) \rho_S] + \text{div}[(1 - \varepsilon) \rho_S \mathbf{v}_S] = 0 \quad (2)$$

Equações do movimento:

$$\varepsilon \rho_F \left[\frac{\partial \mathbf{v}_F}{\partial t} + (\text{grad} \mathbf{v}_F) \mathbf{v}_F \right] = -\text{grad} p - \mathbf{m} + \rho_F \mathbf{g} \quad (3)$$

$$(1 - \varepsilon) \rho_S \left[\frac{\partial \mathbf{v}_S}{\partial t} + (\text{grad} \mathbf{v}_S) \mathbf{v}_S \right] = \text{div} \mathbf{T}_S + \mathbf{m} + (1 - \varepsilon)(\rho_S - \rho_F) \mathbf{g} \quad (4)$$

Equações constitutivas:

$$\mathbf{m} = \frac{\mu_F}{k} \varepsilon \mathbf{U} \quad (5)$$

$$\mathbf{U} = \mathbf{v}_F - \mathbf{v}_S \quad (6)$$

$$\mathbf{T}_S = \mathbf{T}(\mathbf{F}_S) \quad (7)$$

Nestas equações, ε é a porosidade em um ponto da matriz (fração volumétrica ocupada pelo fluido), ρ_f e ρ_s a densidade do fluido e do sólido, $\mathbf{v}_f$ e $\mathbf{v}_s$ a velocidade intersticial das fases fluida e sólida, p a pressão no fluido, $\mathbf{m}$ a força resistiva que o fluido exerce sobre a matriz sólida (por unidade de volume de sistema particulado), $\mathbf{g}$ a intensidade do campo exterior, $\mathbf{T}_S$ a tensão exercida sobre a fase sólida e $\mathbf{F}_S$ o gradiente de deformação (Massarani, 2002).

2.8 A teoria simplificada da filtração

O estabelecimento de uma teoria científica para a filtração exige um envolvimento matemático pesado sobre as equações constitutivas de difícil determinação e que precisam ser consideradas com cautela, especialmente aquelas que correlacionam as propriedades da torta com a pressão nos sólidos. Para escapar a essas dificuldades, o engenheiro procura combinar, no projeto e análise do desempenho da unidade industrial, os resultados de uma teoria simplificada com os dados fornecidos pelo próprio filtro piloto. Pode-se antecipar desde já que este procedimento satisfaz plenamente às necessidades do cotidiano (Massarani, 1985).

2.8.1. Filtração com formação de torta incompressível

Seja a filtração plana como esquematizada na Figura 4. As propriedades da torta são constantes por hipótese e, como consequência, as equações da continuidade indicam que na torta a velocidade do sólido é nula e a velocidade do fluido independe da posição.

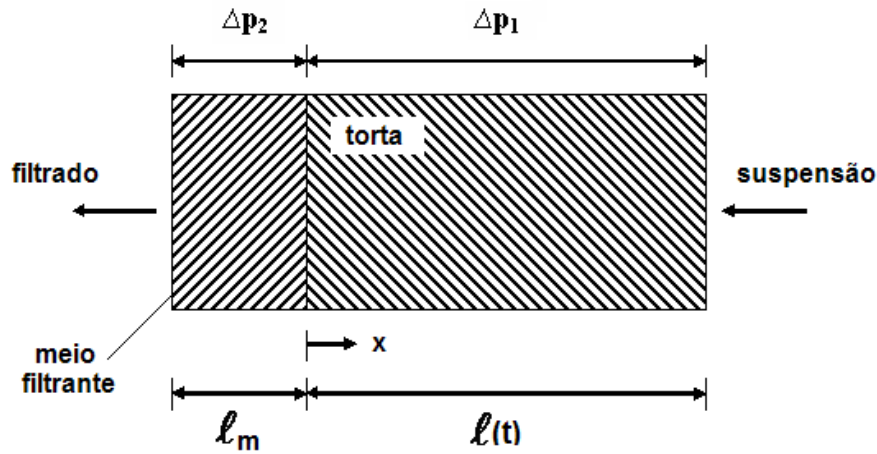


Figura 4: Filtração plana.

Δp_1 e Δp_2 representam a variação de pressão na torta e no meio filtrante, respectivamente, e ℓ_m e $\ell(t)$ são as espessuras do meio filtrante e da torta respectivamente.

Integrando a equação do movimento para o fluido no meio filtrante e na torta, dois meios porosos em série, considerando escoamento Darcyano, resulta a expressão para a queda de pressão no filtro,

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 = \mu q_1 \left[\frac{\ell}{k} + \frac{\ell_m}{k_m} \right] \quad (8)$$

O volume de filtrado V está relacionado à velocidade de percolação através de

$$q = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} \quad (9)$$

onde, q é a velocidade superficial do fluido e A é a área de filtração.

Desprezando a massa de fluido retida na torta face ao volume de filtrado, tem-se a dependência entre V e a espessura da torta ℓ

$$\ell = \frac{C\rho_F V}{(1-\varepsilon)\rho_s A} \quad (10)$$

onde, C é a concentração da suspensão; ρ_F e ρ_s a densidade do fluido e do sólido, respectivamente.

Substituindo as equações 9 e 10 na equação da queda de pressão no filtro, equação 8, e fazendo

$$\alpha = \frac{1}{k(1-\varepsilon)\rho_s} \quad (11)$$

$$R_m = \frac{\ell_m}{k} \quad (12)$$

onde, α é a resistividade da torta, R_m é a resistência do meio filtrante e K a permeabilidade do meio filtrante, chega-se à equação diferencial da filtração

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\mu}{A(\Delta p)} \left(\frac{\alpha C \rho_F V}{A} + R_m \right) \quad (13)$$

na filtração a pressão constante

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu}{A(\Delta p)} \left(\frac{\alpha C \rho_F V}{2A} + R_m \right) \quad (14)$$

sendo t o tempo de filtração e μ a viscosidade do fluido.

O resultado mostra que também na filtração com formação de torta incompressível o volume de filtrado cresce apenas com a raiz quadrada do tempo de filtração.

No processo industrial prevalece, por razões construtivas, a configuração plana. A filtração sobre uma superfície cilíndrica ou esférica leva, no entanto, a capacidades filtrantes superiores, pois, com o crescimento da torta, a área de filtração aumenta com o tempo (Shirato et al., 1973, citado por Massarani, 1985). Na filtração radial com formação de torta incompressível a vazão de líquido em percolação na torta e no meio filtrante independe do ponto considerado. Resultam para as configurações representadas na Figura 5 as equações diferenciais da filtração radial e delas as soluções para o processo a pressão constante:

- Filtração radial sobre superfície cilíndrica

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\mu}{A_1(\Delta p)} \left\{ r_1 \alpha \rho_s (1-\varepsilon) \ell n \left[1 + \frac{CV\rho_F}{r_1^2 \pi L (1-\varepsilon)\rho_s} \right]^{1/2} + R_m \right\} \quad (15)$$

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu}{A_1(\Delta p)} \left\{ \frac{\alpha C \rho_F}{A_1 b^2 V} [(1 + bV) \ln(1 + bV) - bV] + R_m \right\} \quad (16)$$

onde, A_1 é a área superficial do meio filtrante de raio r_1 e altura L e

$$b = \frac{C \rho_F}{\pi r_1^2 L (1 - \varepsilon) \rho_s} \quad (17)$$

- Filtração radial sobre superfície esférica

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\mu}{A_1(\Delta p)} \left\{ r_1 \alpha \rho_s (1 - \varepsilon) \left[1 - \frac{1}{(1 + b^* V)^{1/3}} \right] + R_m \right\} \quad (18)$$

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu}{A_1(\Delta p)} \left\{ \frac{3 \alpha C \rho_F}{A_1 V b^*} \left[V - \frac{3}{2 b^*} \left[(1 + b^* V)^{2/3} - 1 \right] \right] + R_m \right\} \quad (19)$$

onde A_1 é a área superficial do meio filtrante de raio r_1 e

$$b^* = \frac{3 C \rho_F}{4 \pi r_1^3 (1 - \varepsilon) \rho_s} \quad (20)$$

É interessante notar que enquanto a resistividade α caracteriza completamente a torta na filtração plana, equação 13, faz-se necessário o conhecimento adicional da porosidade ε na filtração radial, equações 15 e 16.

A Figura 6 mostra o resultado que se podia esperar, para uma mesma área filtrante e mesmas condições operacionais, é a filtração radial sobre a superfície esférica que leva a uma maior produção de filtrado.

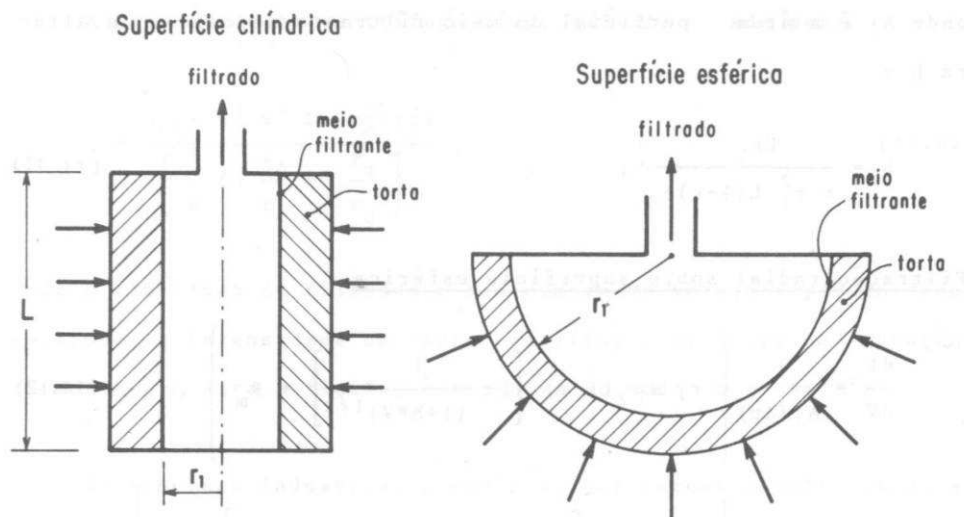


Figura 5: Filtração radial (Massarani, 1985).

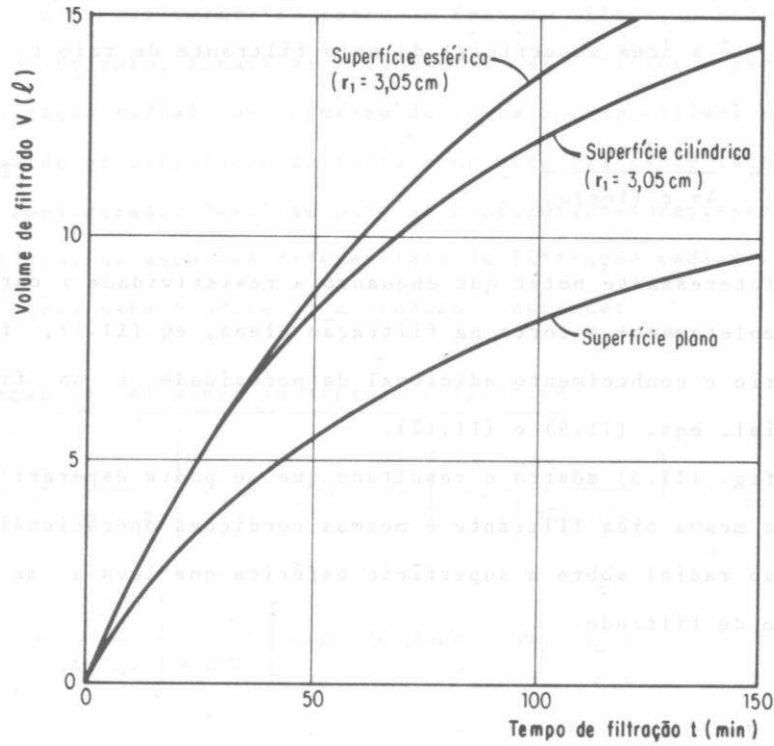


Figura 6: Filtrações plana e radial (Massarani, 1985).

dados: $A_1 = 58,5 \text{ cm}^2$; $\rho_F = 1 \text{ g/cm}^3$; $\mu_s = 0,01 \text{ p}$; $\rho_s = 2,6 \text{ g/cm}^3$

$C = 0,1$; $\varepsilon = 0,57$; $\alpha = 3 \cdot 10^9 \text{ cm/g}$; $R = 2,5 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-1}$; $\Delta p = 5 \text{ atm}$

2.8.2 Filtração com formação de torta compressível

Seja novamente a filtração plana como esquematizada na figura 4. A torta que se forma no processo da filtração é compressível e suas propriedades dependem do sistema sólido-fluido e da pressão que atua sobre a matriz porosa,

$$\varepsilon = \varepsilon(p_s) \quad (21)$$

$$\alpha = \alpha(p_s) \quad (22)$$

onde

$$p_s(x, t) = p(\ell, t) - p(x, t) \quad (23)$$

A teoria simplificada considera que a velocidade do fluido na torta independe, para um dado tempo, da posição, hipótese esta tanto mais razoável quanto menor for a compressibilidade da torta e mais diluída a suspensão submetida ao processo de filtração.

A equação do movimento para o fluido na torta toma a forma

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\partial p_s}{\partial x} = \frac{\mu}{k} q_1 \quad (24)$$

seja a massa de sólido na torta,

$$dm = \rho_s(1-\epsilon) A dx$$

Integrando a eq. 24, resulta:

$$-\int_{p_\ell - p_o}^0 \frac{dp_s}{\alpha} = \frac{p_\ell - p_o}{\langle \alpha \rangle} = \frac{\mu q_1}{A} m \quad (25)$$

onde $\langle \alpha \rangle$ é a resistividade média da torta relativa a Δp_1 (geralmente confundida com a queda de pressão total no filtro, Δp),

$$\langle \alpha \rangle = \frac{p_\ell - p_o}{\int_0^{\Delta p_1} \frac{dp_s}{\alpha}} \quad (26)$$

Seguindo o mesmo procedimento utilizado na filtração com formação de torta incompressível, a teoria simplificada conduz, a partir da equação 25, à equação diferencial da filtração:

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\mu}{A(\Delta p)} \left(\frac{\langle \alpha \rangle C \rho_F V}{A} + R_m \right) \quad (27)$$

onde:

t- tempo de filtração;	$\langle \alpha \rangle$ - resistividade média da torta;
μ - viscosidade do fluido;	ρ_F - densidade do fluido;
A- área de filtração;	v- volume de filtrado;
Δp - queda de pressão;	C- concentração da suspensão.

Em conclusão, o resultado da teoria simplificada é essencialmente o mesmo alcançado na filtração com formação de torta incompressível, equação 13, no qual a resistividade passa a assumir o valor médio expresso pela equação 26. Como consequência, torna-se fácil adaptar para o caso em estudo os resultados previamente estabelecidos para o filtro gravitacional, o filtro à vácuo de tambor rotativo e para a centrífuga filtrante.

2.8.2.1 Determinação experimental de $\langle \alpha \rangle$ e R_m

A determinação experimental dos parâmetros da filtração pode ser feita facilmente no processo à pressão constante. Neste caso a equação 27 toma a forma:

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu}{A(\Delta p)} \left[\frac{\langle \alpha \rangle C \rho_F V}{2A} + R_m \right] \quad (28)$$

resultando os valores de $\langle \alpha \rangle$ e R_m da dependência linear entre t/V e V .

Como exemplo, a figura 7 refere-se à filtração de uma suspensão aquosa de talco, 5% em peso, conduzida no filtro COPPE, e mostra resultados absolutamente clássicos (MacCabe & Smith, 1976, citado por Massarani, 1985):

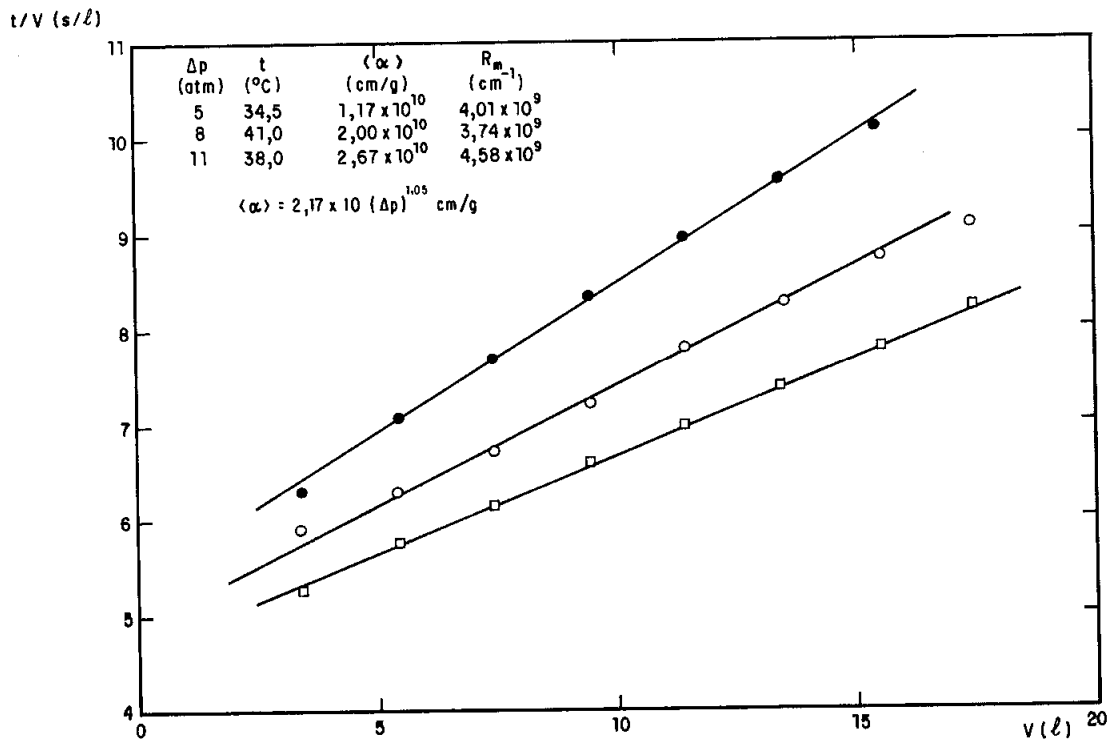


Figura 7: Desempenho do filtro COPPE: suspensão aquosa de talco (5% em peso), área filtrante 670 cm² (Massarani, 1985).

- (a) A dependência linear entre t/V e V é verificada com um coeficiente de determinação r^2 superior a 0,998, comprovando desta maneira a validade da teoria simplificada da filtração.
- (b) A resistividade média da torta é função da pressão de filtração,
 $\langle \alpha \rangle = \alpha_0 (\Delta p)^s$,

onde s é o coeficiente de compressibilidade da torta;

- (c) A resistência do meio filtrante, R_m , pouco varia com a pressão (Massarani, 1985).

2.9 Modelagem físico-matemática para a filtração cruzada com fluido Newtoniano

Uma modelagem físico-matemática da filtração cruzada foi proposta por Ferreira & Massarani (2005), que resulta do escoamento axial da suspensão em tubos, que foram

feitos com um meio poroso usado na filtração industrial. A modelagem foi feita com base na equação da continuidade e do movimento para as fases, e teve como objetivo estabelecer a relação entre o campo de pressão, o escoamento do filtrado e a espessura da torta ao longo do processo. O modelo considera o período de crescimento da torta, com a concomitante redução na taxa de filtração, e o estágio na qual a espessura da torta e o escoamento do filtrado, pode estabilizar ao longo da operação, na qual o filtro funciona como um espessante.

Levando em consideração as prováveis diferenças entre o mecanismo de formação da torta nos modos de filtração, é recomendado que a torta também seja caracterizada por meio de ensaios na própria filtração cruzada.

A modelagem da filtração cruzada proposta por Ferreira & Massarani (2005) corresponde a uma situação onde o esquema é mostrado na Figura 8, na qual o filtrado é pesado e descartado, e a suspensão é retornada para o tanque de alimentação. Durante o estágio de formação da torta, a concentração de sólidos é mantida constante; o começo do espessamento da suspensão avisa o início do processo de estabilização da torta.

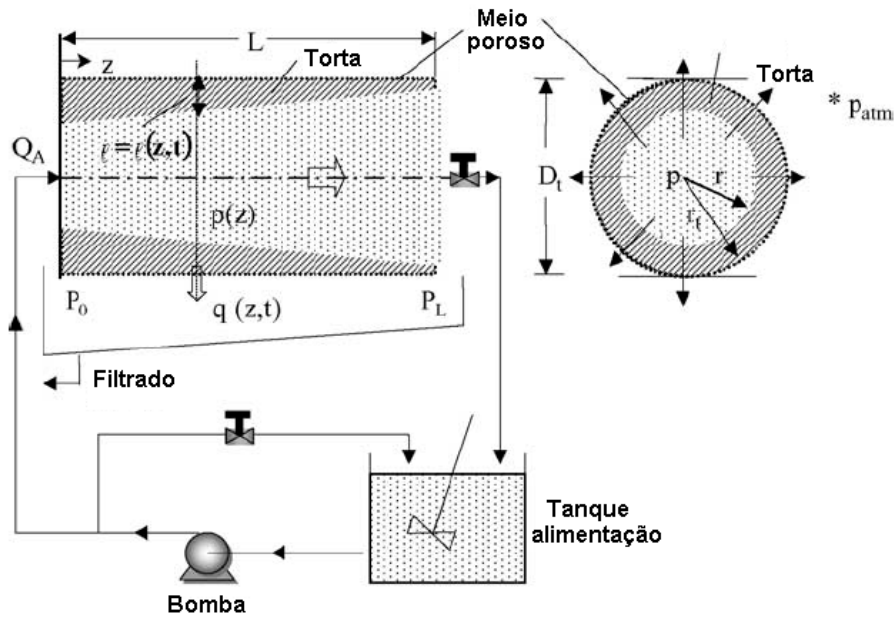


Figura 8: Diagrama do mecanismo de escoamento (Ferreira & Massarani, 2005).

O campo de pressão que é estabelecido pelo escoamento da suspensão através do tubo pode ser desacoplado do processo de filtração quando a permeabilidade da parede porosa (meio poroso + torta) é reduzida. Esta situação é observada na filtração cruzada.

A relação entre a queda de pressão e a taxa de escoamento axial é dada pela seguinte formulação (Ferreira & Massarani, 2005):

$$-\frac{\Delta p}{L} = \frac{f V_M \rho_M}{2 D_t} \quad (29)$$

$$\frac{p_0 - p(z)}{p_0 - p_L} = \frac{z}{L} \quad (30)$$

$$f = f\left(\frac{e}{D_t}, R_{eM}\right) \quad (31)$$

$$R_{eM} = \frac{D_t V_M \rho_M}{\mu_{ef}} \quad (32)$$

$$\rho_M = \varepsilon \rho_f + (1 - \varepsilon) \rho_s \quad (33)$$

$$\lambda^* = \frac{6.4 V_M}{D_t} \quad (34)$$

$$V_M = \frac{Q_A}{A_t} \quad (35)$$

$$\mu_{ef} = \frac{S_M(\lambda^*)}{\lambda^*} \quad (36)$$

A viscosidade efetiva, μ_{ef} , é calculada a partir da reologia da suspensão.

O passo inicial da filtração cruzada é caracterizado pelo crescimento da torta que é formada próximo ao meio filtrante. As equações de conservação de massa e do movimento do fluido, na forma da equação de Darcy, conduz a equação para a filtração cruzada sobre uma superfície cilíndrica.

$$\frac{dt}{dv} = \frac{\mu_F}{(\Delta p)_f} \left\{ \alpha \varepsilon_s \rho_s r_t \ln \frac{r_t}{\left[r_t^2 - \frac{2c \rho_F r_t v}{\varepsilon_s \rho_s} \right]^{1/2}} + R_m \right\} \quad (37)$$

onde t é o tempo de filtração e v o volume de filtrado por unidade de área de filtração,

$$v = \frac{1}{2\pi r} \frac{dV}{dz} \quad (38)$$

A resistividade α e a fração volumétrica de sólidos ε_s , médias em cada sessão do filtro, variam não somente com a pressão de filtração no local, mas também com a estrutura da torta que é depositada.

A espessura da torta e o volume total de filtrado podem ser calculados através das expressões:

$$\ell(z, t) = r_t - \left[r_t^2 - \frac{2c r_t v(z, t)}{\varepsilon_s \rho_s} \right]^{1/2} \quad (39)$$

$$V(t) = \pi D_t \int_0^L v(z, t) dz \quad (40)$$

A estabilização da espessura da torta não toma lugar simultaneamente em todos os pontos do sistema. O teste de cisalhamento direto permite a correlação para o volume de material, tensão de cisalhamento da mobilização τ e a tensão normal σ . As tensões normais e de cisalhamento sobre a superfície da torta são expressas por:

$$t_i = \frac{D_f}{4} \left(-\frac{dp}{dz} \right) = \frac{2f\rho_M Q_A^2}{\pi^2 D_f^4} \quad (41)$$

$$\sigma_i = \frac{\mu_F \delta}{k_i} \left(\frac{dv}{dt} \right) = \eta^* \left(\frac{dv}{dt} \right)_i \quad (42)$$

onde, D_f é o diâmetro livre do tubo para o escoamento axial da suspensão; δ é a espessura associada ao diâmetro médio das partículas D_p e K_i a permeabilidade.

Na análise seguinte, é considerado que as propriedades médias da torta são uma função somente da pressão de filtração, e o fluido que percola é Newtoniano. A integração da equação (37) conduz à equação (43).

$$t = \frac{\mu_F}{(\Delta p)_f} \left\{ \alpha \varepsilon_s \rho_s r_t \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b^n}{2n(n+1)r_t^{2n}} v^n + R_m \right\} v \quad (43)$$

sendo, $b = \frac{2c\rho_F r_t}{\varepsilon_s \rho_s}$ e

$$(\Delta p)_f = \varphi_1(z), \quad \alpha = \alpha[(\Delta p)_f] = \varphi_2(z), \quad \varepsilon_s = \varepsilon_s[(\Delta p)_f] = \varphi_3(z);$$

$\ell(z, t)$ e $V(t)$ podem ser calculados pela equação (39) e (40), respectivamente.

onde:

t- tempo de filtração;	Δp - queda de pressão;
μ_F - viscosidade do fluido;	ρ_F e ρ_s - densidade do fluido e sólido;
α - resistividade da torta;	r_t - raio do tubo;
ε - porosidade da torta;	v- volume de filtrado por área de filtração;
c- concentração da suspensão;	R_m - resistência do meio filtrante.

Os resultados experimentais de Ferreira e Massarani (2002) tiveram como objetivo caracterizar as propriedades da torta que resulta da filtração cruzada e a comparação dos resultados com aqueles obtidos em condições mais simples de “dead-end filtration”.

Para tornar a derivação da equação (37) mais simples Ferreira & Massarani (2005) propuseram resolvê-la pelo método das duas assíntotas de Churchill (1983,

citado por Ferreira & Massarani, 2005), equação (44), através da combinação de resultados durante o período estacionário e transiente,

$$\frac{t}{V} = \left[\left(\frac{t}{V} \right)_t^{-n} + \left(\frac{dV}{dt} \right)_\infty^n \right]^{-\frac{1}{n}} \quad (44)$$

onde n é o parâmetro de ajuste dos dados experimentais e $(t/V)_n$ pode ser calculado a partir da equação (45), lembrando que a função $v(z,t)$ vem da equação (43),

$$\left(\frac{t}{V} \right)_t = \frac{1}{\pi D_t \int_0^L v(z,t) dz} \quad (45)$$

A Figura 9 mostra os resultados experimentais obtidos e também o ajuste feito pela equação (44), com $n=2$. Os autores conseguiram prever com boa concordância o comportamento linear da relação t/v versus v , onde o fluxo de permeado estabiliza com o tempo.

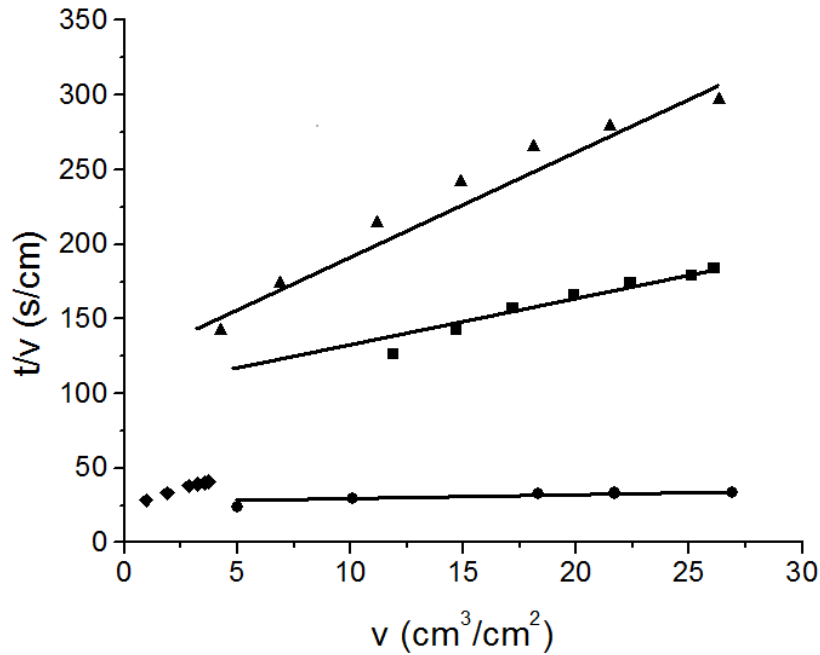


Figura 9: Resultados experimentais para a filtração cruzada. (Ferreira & Massarani, 2005). ♦ Exp 3- $(\Delta P)_f = 0,8$ atm, $c = 0,022$ p/p; ● Exp 6- $(\Delta P)_f = 2,2$ atm, $c = 0,033$ p/p; ■ Exp 9- $(\Delta P)_f = 1,0$ atm, $c = 0,030$ p/p; ▲ Exp 11- $(\Delta P)_f = 0,5$ atm, $c = 0,032$ p/p; — ajuste da equação (44) com $n = 2$.

Para Ferreira & Massarani (2005) os ensaios desenvolvidos com a filtração cruzada mostraram que a torta formada pode ser considerada incompressível.

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, três unidades experimentais foram construídas com o objetivo de estudar a filtração de suspensões de carbonato de cálcio. Os resultados obtidos foram utilizados para avaliar os parâmetros como resistividade da torta, resistência do meio filtrante e porosidade da torta, bem como avaliar os resultados fornecidos pelo modelo proposto por Ferreira & Massarani (2005) para a filtração cruzada.

3.1 A unidade piloto para a filtração cruzada

Para o estudo da filtração cruzada, construiu-se uma unidade piloto como mostra o esquema na figura 10. Nas figuras 11, 12 e 13 podem ser vistas fotos da unidade montada no laboratório. A unidade consistia basicamente de um reservatório de suspensão (capacidade total de 500 litros) ligado a uma bomba de deslocamento positivo (1,5 cv – Weatherford) que alimentava uma linha contendo o filtro e uma corrente de “by-pass”. O sistema era dotado também de um agitador mecânico de forma a manter a suspensão homogênea dentro do reservatório. A descarga do “by-pass” e o volume de filtrado recolhido foram direcionados para o próprio reservatório. O controle da pressão de filtração desejada para cada experimento foi feito com o auxílio de um manômetro de Bourdon instalado imediatamente antes da entrada do filtro. Para estabelecer a pressão inicial de filtração, manipulava-se a vazão de suspensão através da abertura ou fechamento de uma válvula presente na corrente de “by-pass”. A queda de pressão no filtro foi medida com o auxílio de transdutores de pressão (SMAR), como mostra a figura 14, calibrados na faixa de 0-36 mmHg, 0-350 mmHg e 0-1800 mmHg. A tubulação empregada para a construção da unidade foi de PVC e com diâmetro de 1 polegada.

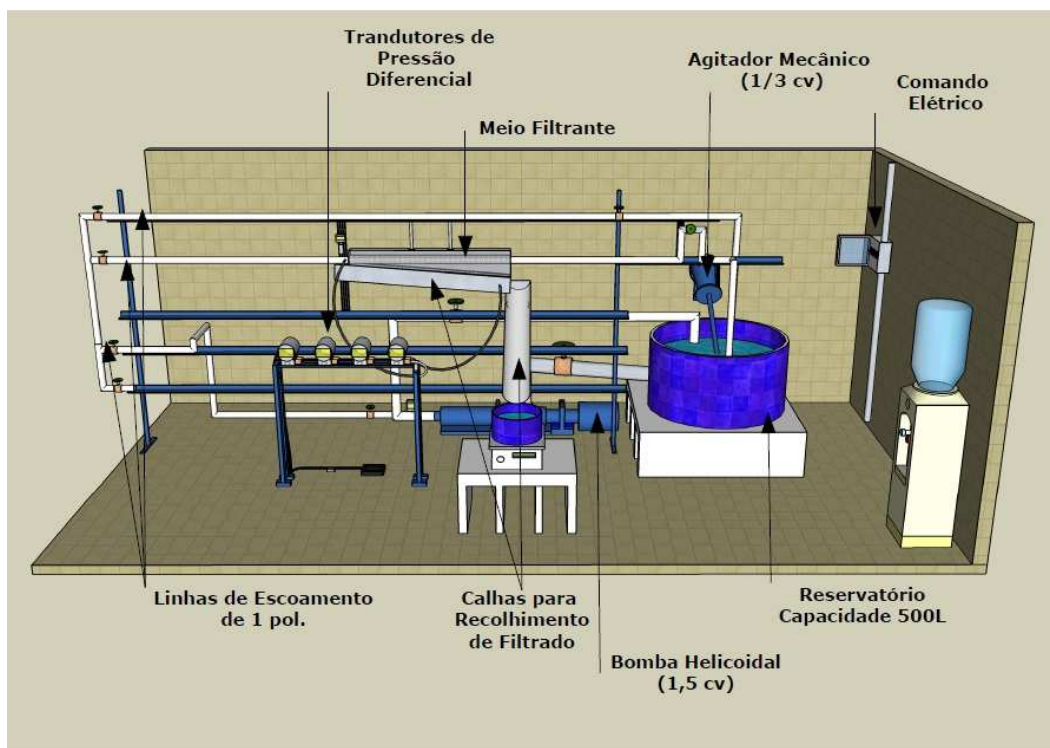


Figura 10: Esquema representativo da unidade piloto.



Figura 11: Foto da unidade experimental equipada para a filtração



Figura 12: Vista lateral da unidade.



Figura 13: Tanque agitado com suspensão



Figura 14: Medidores de pressão diferencial (SMAR).

Para a determinação dos parâmetros da filtração cruzada como resistividade da torta e resistência do meio filtrante, em cada experimento foi necessário medir as seguintes variáveis:

- Volume de filtrado;
- Tempo de filtração;
- Pressão de filtração;
- Concentração da suspensão;

- Temperatura da suspensão;
- Vazão do retido;
- Porosidade da torta.

3.2 Unidade de bancada para o filtro folha

Um esquema da unidade de bancada para a filtração plana pode ser vista na Figura 15. A unidade construída consistia de um reservatório de suspensão (Becher), com capacidade de 2 litros, ligado a uma bomba de vácuo através de mangueiras. O sistema também constava de agitador magnético (placa de agitação) para garantir a homogeneização da suspensão. Um septo filtrante (filtro folha) constituído de tecido de filtração (Tecitec) foi utilizado para realizar a filtração. Uma proveta graduada de 0 a 1000 mililitros foi utilizada entre o filtro folha e a bomba de vácuo com o objetivo de quantificar o volume de filtrado de acordo com o tempo de filtração. Um suporte também foi utilizado para fixar o filtro folha e o vacuômetro.

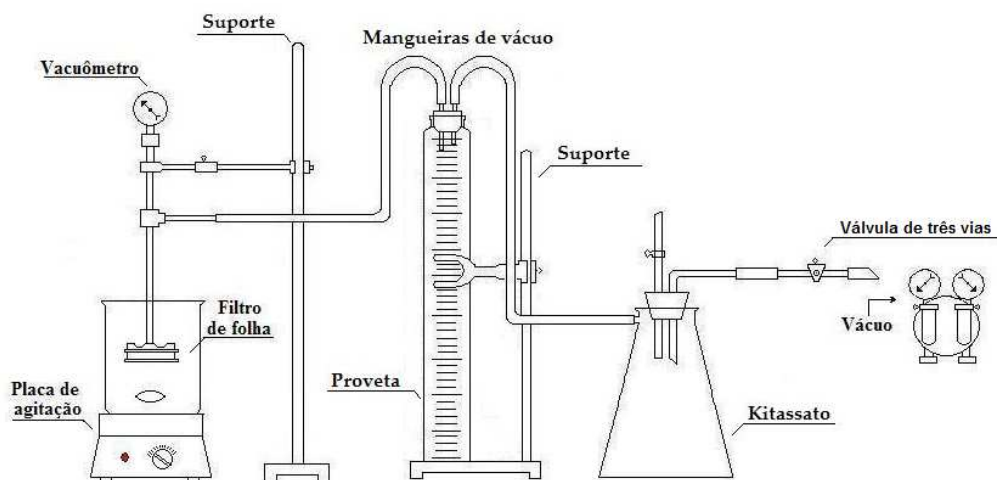


Figura 15: Esquema da unidade de bancada do filtro folha.

Uma foto da unidade montada para a filtração em filtro folha pode ser mostrada na Figura 16.



Figura 16: Foto da unidade de bancada do filtro folha.

3.3 Unidade experimental para a filtração sob pressão

Utilizou-se também uma unidade experimental para a filtração plana sob pressão, que foi construída através de uma adaptação a partir da unidade experimental da filtração cruzada. Onde anteriormente existia o meio filtrante para a filtração cruzada, foi adaptada uma linha contendo uma válvula de restrição, um manômetro de Bourdon e uma célula de filtração onde foi fixado o meio filtrante (tecido de filtração). Foi utilizada uma balança eletrônica (Filizola, 15kg) para aferir a massa de filtrado de acordo com o tempo de filtração. As figuras 17 e 18 mostram, respectivamente, um esquema e uma foto real da unidade experimental adaptada.

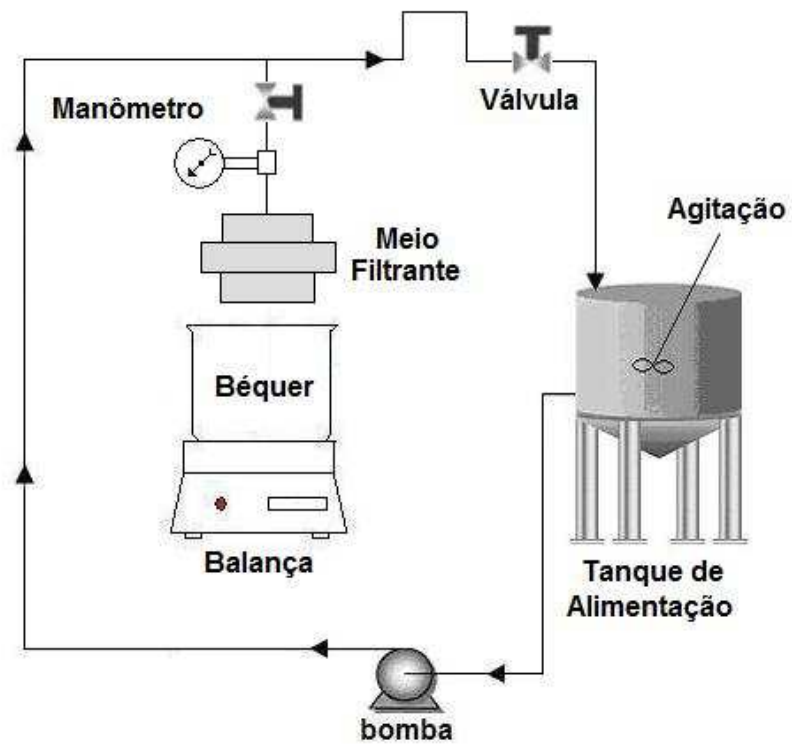


Figura 17: Unidade experimental para a filtração plana sob pressão.



Figura 18: Foto da unidade experimental para a filtração plana sob pressão.

3.4 Equipamento de filtração HTHP

Foi utilizado ainda um equipamento de filtração estática Filter Press HTHP 175 ml (Fann Instruments) para obter volume de filtrado e tempo de filtração, com o objetivo de comparar os parâmetros obtidos com aqueles determinados pelo filtro folha, filtração cruzada e filtração sob pressão. O gás nitrogênio foi utilizado na linha pressurizada. O equipamento utiliza anéis de vedação, para fixar o tecido de filtração e evitar vazamentos próximo a parede da célula, tampa superior fixada com parafusos, compartimento com capacidade de 175 ml para armazenar a suspensão e aberturas na parte superior e inferior do compartimento, para permitir a entrada de pressão e saída de filtrado, respectivamente. A figura 19 mostra o aparato experimental utilizado para os experimentos relativos à filtração HTHP.



Figura 19: Aparato experimental utilizado para a filtração plana, filtro HTHP.

3.5 Medidas de concentração e vazão

Para a filtração cruzada, a concentração de sólidos foi medida durante cada experimento. Recolhia-se certa quantidade de suspensão proveniente da corrente de retido em um béquer, colocava-se sob agitação e, com uma pipeta, retiravam-se 3 amostras de 20 ml de suspensão. Tal amostra era introduzida em recipientes (fôrmas) previamente pesados. Estas amostras eram novamente pesadas e depois levadas a uma estufa com temperatura interna de 105 °C para secar. Após 24 horas retiravam-se as fôrmas da estufa e aguardava-se seu resfriamento para uma nova pesagem. Uma imagem das fôrmas após sua retirada da estufa pode ser vista na Figura 20.



Figura 20: Fôrmas contendo carbonato de cálcio remanescente após secagem.

Desta forma, conhecendo-se a quantidade de água e de sólidos residuais calculava-se a concentração, em peso, da suspensão. A vazão mássica da corrente de retido para a filtração cruzada foi obtida através da coleta de suspensão durante um determinado tempo. Repetia-se este procedimento três vezes com o intuito de obter um valor médio para esta vazão.

O cálculo da concentração da suspensão para a filtração em filtro folha e filtração sob pressão foi feito de maneira análoga à descrita na filtração cruzada. Já para a filtração HTHP, a concentração da suspensão foi prevista adicionando certa quantidade de carbonato a uma quantia exata de água, de acordo com os valores de concentração exigidos em cada experimento.

Para a filtração sob pressão a vazão da corrente de retido foi calculada da mesma maneira descrita na filtração cruzada. Para a filtração HTHP e folha não houve corrente de retido.

3.6 Determinação da porosidade

Através do recolhimento de uma fração da torta, após cada experimento para ambos os processos de filtração, determinou-se a porosidade da mesma pela seguinte relação:

$$\varepsilon = \frac{\text{volume de vazios}}{\text{volume total}}$$

onde, o volume de vazios é representado pelo volume de água presente na estrutura da torta recolhida. É possível quantificar este volume de água após a secagem da fração da torta que foi retirada após cada experimento, e levada à estufa. O volume de vazios é igual ao volume de água evaporada contida na torta fresca.

3.7 Material particulado

Em todos os testes realizados foram utilizados suspensões de carbonato de cálcio em diferentes concentrações e pressões. O carbonato de cálcio utilizado, $\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$ (Perry, 1953), em todos os experimentos possuía granulometria compreendida entre 1 e 10 μm , como mostra a figura 21. O gráfico abaixo mostra a distribuição do tamanho de partículas para o CaCO_3 , e foi realizado no equipamento Malvern Mastersizer 2000 (Malvern Instruments).

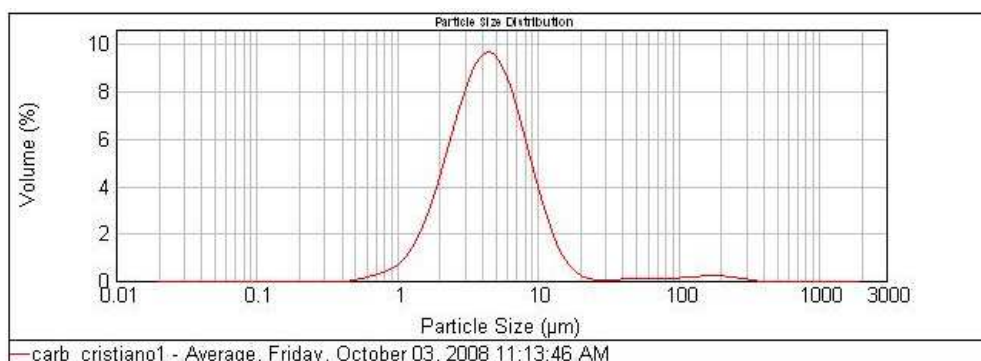


Figura 21: Distribuição do tamanho das partículas para o carbonato de cálcio.

3.8 Os meios filtrantes

Foram adquiridos diferentes meios porosos fabricados com diferentes matérias primas e dimensões. Partiu-se do princípio que o meio poroso deveria ter forma geométrica cilíndrica, para que a filtração ocorresse na direção radial, simulando assim a mesma condição existente na filtração durante o processo de perfuração de poços. O primeiro material adquirido foi constituído de aço inox sinterizado como mostra a Figura 22. O princípio da sinterização consiste na fundição de materiais metálicos formando assim uma peça sólida, porém porosa pela existência de vazios entre os grãos. A peça utilizada tinha diâmetro interno de $\frac{3}{4}$ de polegadas e 20 centímetros de comprimento, com permeabilidade de 1 Darcy e 0,4 centímetros de espessura de parede.



Figura 22: Meio poroso sinterizado de aço inox.

O segundo material adquirido era constituído de fibras prensadas de polipropileno fabricadas especificamente para tratamento de água, conforme mostrado

na Figura 23, com porosidade variável entre 1 e 50 micrômetros, comprimento de 50 centímetros, espessura da parede de 1 cm e diâmetro interno de 1 polegada.



Figura 23: Meio poroso em polipropileno e detalhe da tomada de pressão.

Finalmente, utilizou-se tecidos de filtração fabricados pela TECITEC mostrado na Figura 24. O constituinte principal do tecido foi polietileno de acordo com a empresa. O tecido foi parafusado junto a duas barras de ferro de modo a produzir uma forma cilíndrica com diâmetro interno de 1 polegada, espessura de parede de aproximadamente 0,1 centímetro e comprimento de 1 metro.



Figura 24: Meio poroso composto por tecido de filtração.

3.9 Procedimento experimental

Os experimentos foram realizados com as concentrações de 2%, 4% e 6% e pressões de 1kgf/cm², 1,5 kgf/cm² e 2 kgf/cm². Os experimentos no filtro folha foram limitados devido às condições de vácuo.

Para o processo da **filtração cruzada**, a sistemática de realização do experimento consistia simplesmente em regular a vazão de “by-pass” através da válvula de modo a obter uma determinada leitura de pressão na alimentação. Com o equipamento em circuito fechado, aguardavam-se alguns instantes para que o processo

entrasse em regime. A suspensão de carbonato de cálcio ($\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$) utilizada nos experimentos foi preparada adicionando o carbonato em uma determinada quantidade de água previamente calculada. Fazia-se a suspensão circular na linha produzindo um volume de filtrado (volume advindo do escoamento radial) e de retido (volume advindo do escoamento axial). O volume de filtrado foi quantificado com o tempo de filtração. A pressão de filtração foi medida por um manômetro instalado imediatamente antes da entrada do meio filtrante, e as alíquotas de suspensão foram recolhidas durante a filtração para a determinação da concentração. A vazão de retido foi medida por técnica gravimétrica com triplicata para cada ponto. A temperatura também foi aferida para cada experimento. Uma fração da torta formada foi retirada ao final de cada experimento para a determinação da porosidade.

Os dados de volume de filtrado com o tempo de filtração foram trabalhados em uma planilha do Excel, e plotados em um gráfico t/v versus v , para a filtração cruzada. A variável v representa o volume de filtrado por unidade de área de filtração. O objetivo do gráfico t/v versus v (ou t/V versus V , como será visto mais adiante) é a determinação dos parâmetros α e R_m , a partir dos valores dos coeficientes angular e linear da reta formada no segundo período de filtração. O segundo período da filtração é caracterizado quando há o estabelecimento da espessura da torta de filtração, proveniente do equilíbrio entre a taxa de cisalhamento da corrente de alimentação e a taxa de deposição das partículas em suspensão.

Com relação aos experimentos no **filtro folha**, a suspensão foi homogeneizada com o auxílio de agitador magnético (placa de agitação) e o septo filtrante, filtro folha, foi introduzido no reservatório. A bomba a vácuo foi acionada e o processo de filtração iniciou-se. O volume de filtrado foi quantificado através da proveta, o tempo de filtração foi anotado e a pressão de filtração foi fornecida pelo vacuômetro. A temperatura foi medida para cada experimento. Uma fração da torta formada também foi retirada ao final do experimento para a determinação da porosidade. Para todos os experimentos da filtração plana a equação 28 foi utilizada para a determinação de $\langle \alpha \rangle$ e R_m . As coordenadas dos gráficos de volume de filtrado versus tempo de filtração para a filtração plana são descritas como t/V e V , onde V é simplesmente o volume de filtrado obtido experimentalmente.

Para a **filtração plana HTHP**, os volumes de filtrado de acordo com o tempo de filtração foram obtidos com o auxílio do equipamento Filter Press HTHP 175 ml (fann Instruments). A suspensão foi preparada analogamente ao processo já descrito na filtração cruzada. O aparato era conectado a uma linha pressurizada sendo possível controlar a pressão para cada um dos experimentos. Foi utilizado também nos experimentos com o filtro HTHP o tecido de filtração como meio poroso, descartando assim, o meio filtrante de cerâmica que geralmente é utilizado no mesmo.

Para a **filtração sob pressão**, o procedimento experimental foi idêntico ao da filtração cruzada no que se refere ao preparo da suspensão, estabelecimento da pressão de filtração, pesagem do filtrado e avaliação da torta final de filtração.

4- RESULTADOS E DISCUSSÕES

Uma malha experimental foi adotada para a realização dos experimentos e pode ser vista na Figura 26. A malha construída mostra os valores mínimos e máximos para concentração (m/m, massa de soluto/massa de solução) e pressão (kgf/cm²), utilizada nos experimentos. Todas as combinações experimentais descritas na malha abaixo foram reproduzidas para a filtração cruzada, sob pressão e HTHP. Para o filtro folha, não foi possível realizar todos os experimentos devido às condições de operação à vácuo.

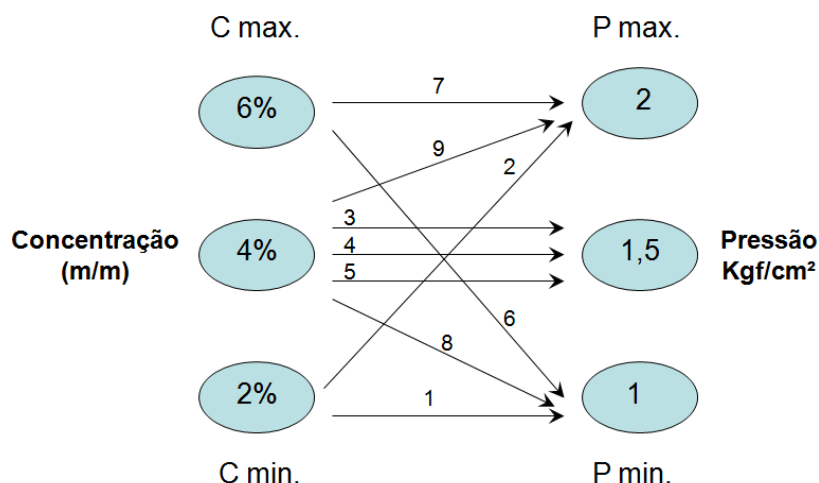


Figura 25: Esquema da malha experimental com os números dos respectivos experimentos realizados.

4.1 Meio poroso utilizado

Para definir qual meio poroso seria utilizado foi necessário verificar através de alguns ensaios o tempo gasto para a estabilização do diferencial de pressão e, conseqüentemente, volume de filtrado, utilizando apenas água. Para o meio poroso sinterizado, poucos minutos após o início do teste, houve total colmatação do meio, impedindo a continuação do teste e, conseqüentemente, o descarte desse meio poroso. Para o filtro com tecido de filtração, pode-se observar pela Figura 25 que o mesmo alcança o regime permanente (estabilização do diferencial de pressão) em um intervalo de tempo de aproximadamente 100 minutos. Já para o filtro de polipropileno, ainda na Figura 25, foi observado que, com 200 minutos, o sistema ainda não havia atingido o regime permanente, supondo que o mesmo deverá ocorrer em um intervalo de tempo relativamente maior que o filtro anterior.

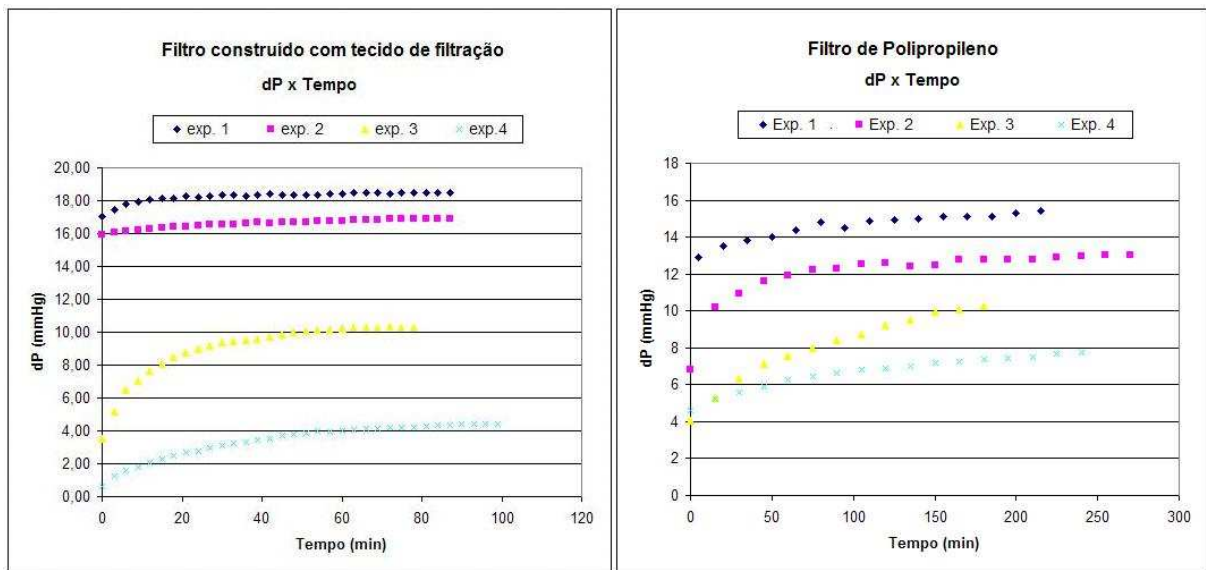


Figura 26: Comparação entre os tempos de estabilização do diferencial de pressão para os dois filtros.

Portanto, dentre os meios filtrantes acima testados, o que foi utilizado para gerar os resultados presentes nesse trabalho, foi o tecido de filtração da empresa TECITEC, pois, o mesmo, apresentou menor tempo para a estabilização de ΔP e vazão de filtrado. Este tecido foi utilizado em todas as unidades construídas e também para a filtração HTHP, sendo o mesmo usado apenas uma vez e descartado após cada experimento.

4.2 Curvas de filtração

Os resultados experimentais de tempo de filtração e volume de filtrado foram obtidos a partir das unidades de filtração construídas e do equipamento de filtração HTHP. Os resultados de volume de filtrado com o tempo de filtração para todos os experimentos relativos à filtração plana e cruzada foram plotados nas figuras 27, 28, 29 e 30. Deve-se ressaltar que os valores de volume de filtrado já estão normalizados pela área de filtração utilizada em cada caso.

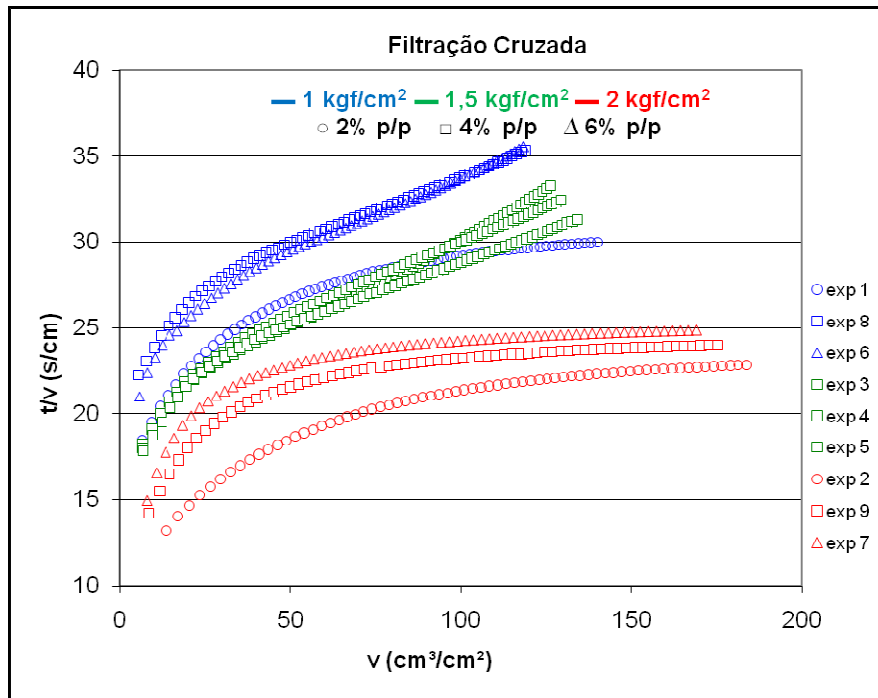


Figura 27: Gráfico dos resultados experimentais para a filtração cruzada.

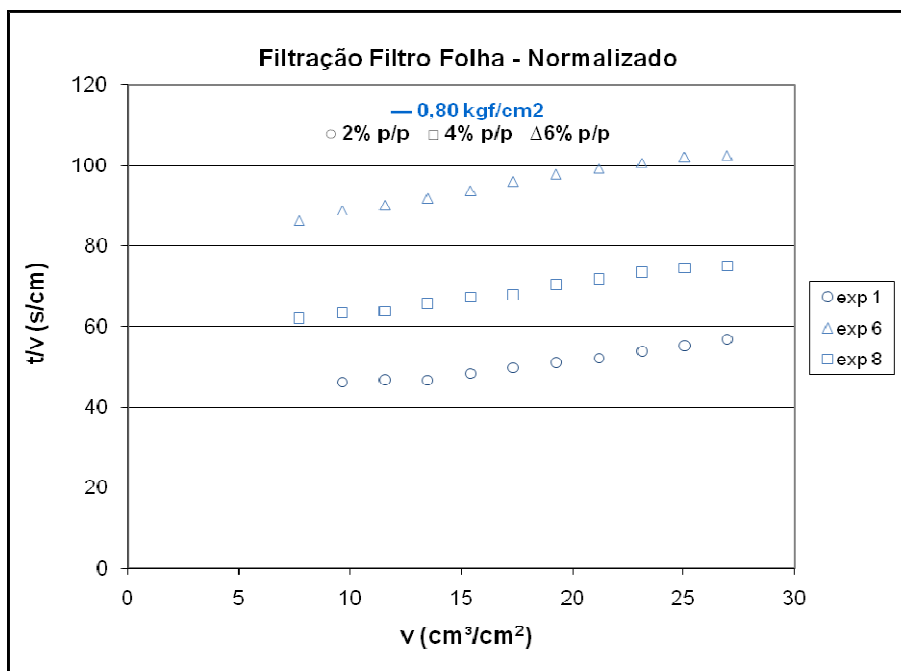


Figura 28: Gráfico dos resultados experimentais para a filtração em filtro folha.

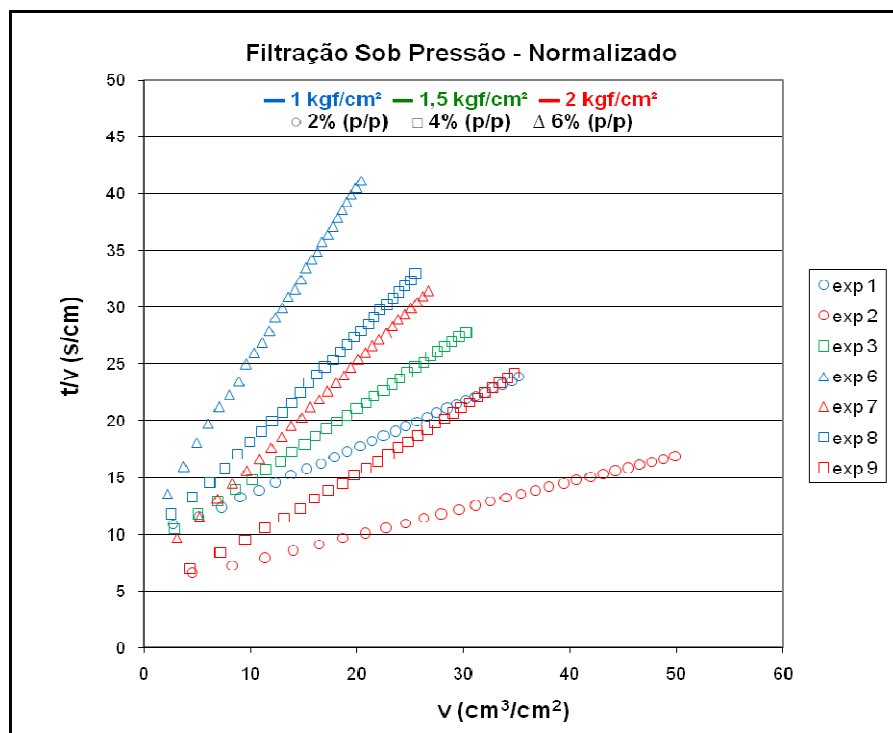


Figura 29: Gráfico dos resultados experimentais para a filtração sob pressão.

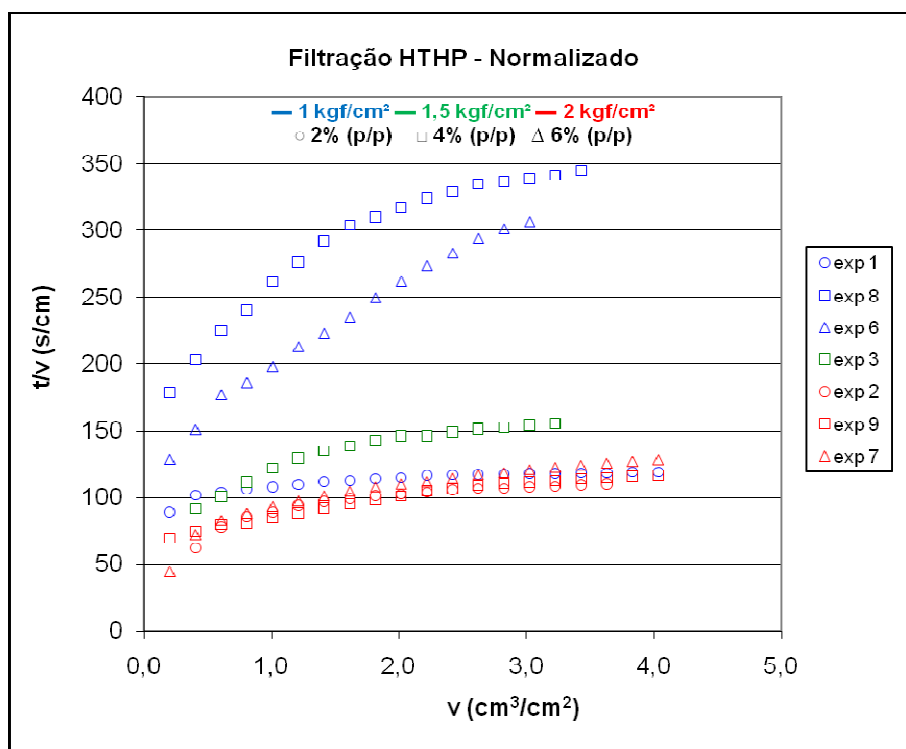


Figura 30: Gráfico dos resultados experimentais para a filtração HTHP.

As curvas de filtração obtidas apresentam comportamento esperado, ou seja, o aumento da pressão para uma mesma concentração ocasiona um aumento no volume de filtrado e o aumento da concentração, para uma mesma pressão, gera uma redução no volume obtido do mesmo. Pode-se verificar também que a curva obtida na filtração dinâmica apresenta dois estágios. No primeiro, o fluxo de permeado cresce de forma não-linear com o volume de filtrado (v), o que pode estar relacionado com o estabelecimento da torta de filtração que, neste caso, sofre cisalhamento do escoamento axial do fluido. Este período pode-se estender por mais de 1 hora no caso mais crítico, como no experimento 2, onde tem-se a maior pressão de filtração (2 kgf/cm²) e a menor concentração (2% p/p). O segundo estágio é caracterizado pelo comportamento linear da relação t/v versus v , que é típico da filtração plana.

Nas Figuras 28 e 29 podem ser observadas as retas típicas da filtração plana, onde o comportamento linear da relação t/v versus v aparece desde os primeiros segundos da filtração. Neste caso, vale lembrar que a suspensão escoou perpendicularmente ao tecido filtrante e não há cisalhamento da torta.

As curvas de filtração obtidas no HTHP apresentam um comportamento diferenciado. Pode observar, por exemplo, que no experimento 8 há praticamente 2 períodos lineares, o que também ocorre no experimento 3, dificultando a avaliação dos parâmetros da torta.

4.3 Avaliação experimental dos parâmetros α e R_m

Os valores de α e R_m foram determinados com o objetivo de compará-los. Todos os experimento da filtração plana e o experimento 3 da filtração cruzada foram realizados em triplicata, o que leva a concluir que os valores de α e R_m descritos nas Tabelas 1 e 2, respectivamente, representam a média aritmética de três experimentos iguais. Os valores de α e R_m são obtidos a partir dos valores dos coeficientes angulares e lineares das retas finais, formadas pelos pontos experimentais gerados em cada teste. Os valores de α e R_m para a filtração cruzada foram determinados pela equação (43), com $n=1$, uma vez que a diferença de pressão na direção axial é aproximadamente constante e baixa, da ordem de 10 a 30 mmHg, permitindo assim a obtenção de valores médios para resistividade da torta, α , e resistência do meio filtrante, R_m . Para a filtração plana, a equação (28) foi utilizada para a determinação dos mesmos.

Tabela 1: Valores de α para os dois modos de filtração usando o filtro HTHP e as unidades construídas.

Exp.	c (p/p)	P (kgf/cm ²)	α_{CRUZADA} (cm/g)	α_{HTHP} (cm/g)	$\alpha_{\text{PRESSÃO}}$ (cm/g)	α_{FOLHA} (cm/g)
1	0,02	1,0	$2,30 \times 10^8$	$1,75 \times 10^{10}$	$4,14 \times 10^9$	$3,23 \times 10^9$
2	0,02	2,0	$3,46 \times 10^8$	$9,21 \times 10^{10}$	$4,17 \times 10^9$	-
3	0,04	1,5	$6,29 \times 10^8$	$7,20 \times 10^{10}$	$4,79 \times 10^9$	-
6	0,06	1,0	$2,58 \times 10^8$	$2,03 \times 10^{11}$	$5,09 \times 10^9$	$2,57 \times 10^9$
7	0,06	2,0	$6,60 \times 10^7$	$1,21 \times 10^{11}$	$5,55 \times 10^9$	-
8	0,04	1,0	$3,75 \times 10^8$	$7,71 \times 10^{10}$	$5,27 \times 10^9$	$2,87 \times 10^9$
9	0,04	2,0	$1,36 \times 10^8$	$1,85 \times 10^{11}$	$6,27 \times 10^9$	-

Como pode ser observado os valores de α encontrados na filtração cruzada, em comparação com a filtração plana, diferem inclusive na ordem de grandeza. Em todos os casos a resistividade da torta na filtração plana é superior que na cruzada, como já relatado na literatura (Lawhon et al., 1967). Para a filtração no HTHP os resultados apresentam duas ordens de grandeza superior. Neste equipamento, o modo de filtração é muito distinto, uma vez que são colocados 175 ml de suspensão na célula de filtração e se pressuriza o sistema para a geração do filtrado. Entre a instalação da célula de filtração e a pressurização do sistema existe um tempo morto, de aproximadamente 60 segundos, onde já é possível ocorrer sedimentação gravitacional do carbonato de cálcio e, conseqüente interferência no processo de formação da torta.

Pode-se observar também pelos resultados da Tabela 1, que o modo de filtração interfere no critério de formação da torta conduzindo a diferentes valores de α . Os experimentos realizados para a filtração sob pressão e filtro folha são os que apresentam alguma semelhança em seus valores de resistividade. Neste caso, deve ser levado em consideração que os experimentos do filtro folha foram realizados à vácuo, 0,80 kgf/cm², o que difere da filtração sob pressão que foi realizada a 1 kgf/cm².

Os resultados para resistência do meio filtrante são apresentados na Tabela 2 e indicam valores semelhantes para filtração cruzada, sob pressão e à vácuo. Para o HTHP os resultados são uma ordem de grandeza superiores, o que pode indicar que neste equipamento, o fato de a suspensão ficar em repouso durante a pressurização pode gerar uma migração de finos para o tecido ocasionando uma redução da permeabilidade do mesmo e um aumento da resistência do meio filtrante.

Tabela 2: Valores de R_m para os dois modos de filtração usando o filtro HTHP e as unidades construídas.

Exp.	c (p/p)	P (kgf/cm ²)	$R_{m\text{CRUZADA}}$ (1/cm)	$R_{m\text{HTHP}}$ (1/cm)	$R_{m\text{PRESSÃO}}$ (1/cm)	$R_{m\text{FOLHA}}$ (1/cm)
1	0,02	1,0	$2,62 \times 10^9$	$1,07 \times 10^{10}$	$9,42 \times 10^8$	$3,67 \times 10^9$
2	0,02	2,0	$3,86 \times 10^9$	$2,07 \times 10^{10}$	$9,74 \times 10^8$	-
3	0,04	1,5	$2,89 \times 10^9$	$1,71 \times 10^{10}$	$1,25 \times 10^9$	-
6	0,06	1,0	$2,48 \times 10^9$	$1,19 \times 10^9$	$1,31 \times 10^9$	$6,07 \times 10^9$
7	0,06	2,0	$4,56 \times 10^9$	$1,40 \times 10^{10}$	$1,41 \times 10^9$	-
8	0,04	1,0	$2,54 \times 10^9$	$2,89 \times 10^{10}$	$1,11 \times 10^9$	$4,15 \times 10^9$
9	0,04	2,0	$4,24 \times 10^9$	$1,16 \times 10^{10}$	$1,12 \times 10^9$	-

Nas figuras 31 e 32 são mostrados exemplos de tortas formadas na filtração cruzada e plana, respectivamente. Amostras destas tortas foram utilizadas para a determinação da porosidade das mesmas. Os valores podem ser encontrados para todos os experimentos na tabela 3. Verifica-se por essa tabela que os resultados de porosidade, ϵ , pouco variaram no conjunto de experimentos realizados apresentando valor médio de

($0,56 \pm 0,01$), e que de maneira geral, quanto maior a pressão para uma mesma concentração, menor é a porosidade, e para uma dada pressão, quanto maior a concentração, menor a porosidade, como já era de se esperar. Não foi possível avaliar a porosidade da torta no HTHP devido a dificuldades experimentais. Mesmo na condição experimental de maior pressão e concentração não pode ser observado a formação de uma torta de filtração, cuja estrutura fosse consistente para a avaliação da porosidade.



Figura 31: Imagem da torta formada na filtração cruzada a uma pressão de 2 kgf/cm².

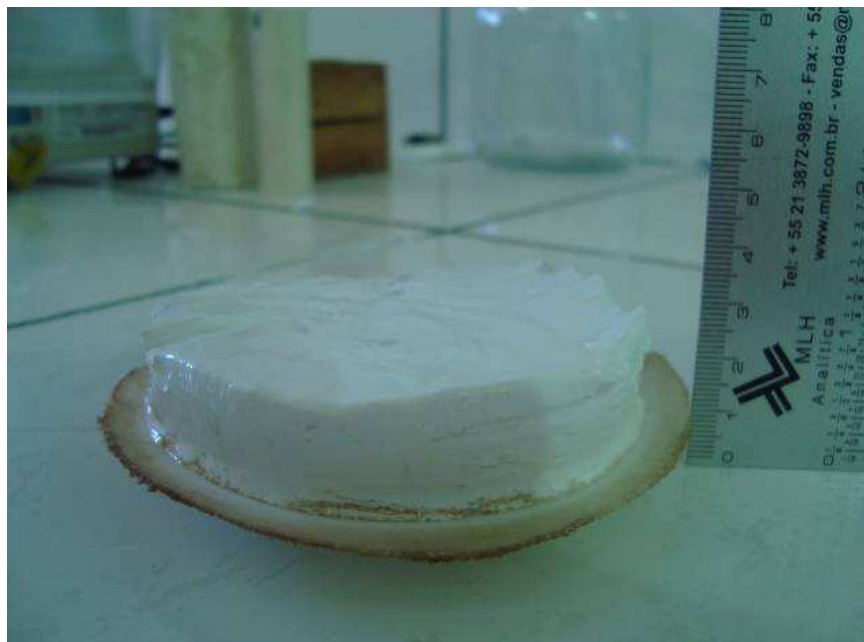


Figura 32: Imagem da torta formada na filtração sob pressão, filtro folha e HTHP.

Com relação ao aspecto das tortas formadas para a filtração cruzada, foi observado ao longo dos experimentos que quanto maior a pressão de filtração, maior foi a espessura e a consistência da torta, mesmo que, para tal situação, a tensão de cisalhamento tenha sido a maior. A espessura da torta para a filtração cruzada variou entre 2 e 4 milímetros, sendo o menor valor, para a menor pressão, 1 kgf/cm², e o maior, para a maior pressão, 2 kgf/cm². Na filtração plana as espessuras das tortas foram maiores, variando de 0,5 e 1,5 cm, e apresentaram maior consistência independente da pressão e concentração trabalhada, quando comparada as tortas geradas na filtração cruzada.

Tabela 3: Valores de porosidades para a filtração cruzada, filtro sob pressão e folha.

Exp.	c (p/p)	P (kgf/cm ²)	$\epsilon_{\text{CRUZADA}}$	$\epsilon_{\text{PRESSÃO}}$	ϵ_{FOLHA}
1	0,02	1,0	0,56	0,56	0,57
2	0,02	2,0	0,54	0,56	-
3	0,04	1,5	0,55	0,57	-
6	0,06	1,0	0,55	0,58	0,55
7	0,06	2,0	0,54	0,57	-
8	0,04	1,0	0,57	0,58	0,55
9	0,04	2,0	0,54	0,56	-

4.4 Resultados da simulação

Na figura 33 são apresentados os resultados da simulação utilizando o modelo proposto por Ferreira e Massarani (2005), equação (43), para a filtração dinâmica. Pode-se observar por esta figura que o modelo consegue prever a fase onde o fluxo de permeado aumenta de forma não linear com o volume. Este período representa o início da formação da torta sobre a superfície porosa e é importante para prever a invasão de fluido de perfuração na formação. O período linear de curva de fluxo também é bem representado pela equação, como já obtido por Ferreira & Massarani (2005).

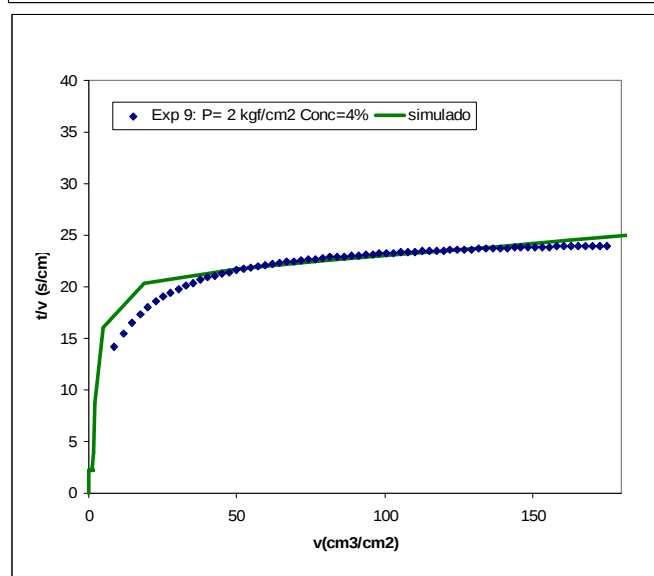
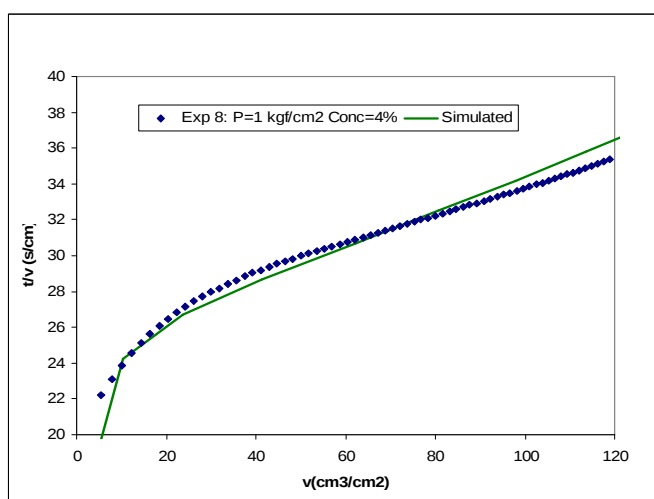
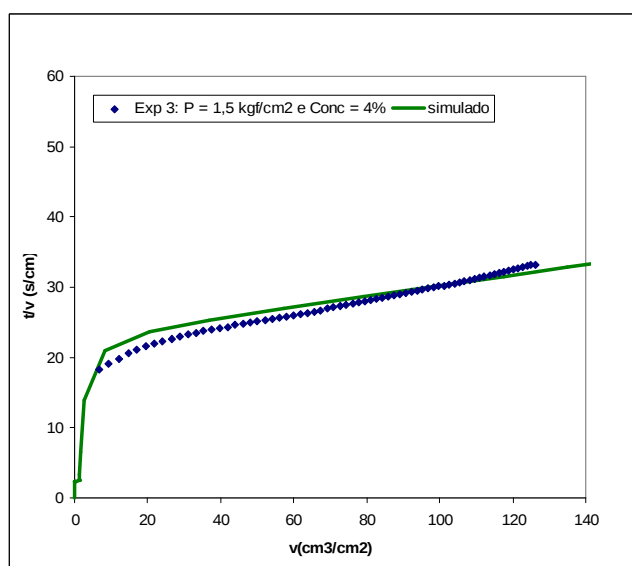


Figura 33: Resultados típicos da comparação entre os dados de simulação e experimentais da filtração dinâmica.

Para recuperar o comportamento do modelo no período de crescimento da torta, a equação (43) proposta por Ferreira e Massarani (2005), que é uma equação diferencial ordinária de primeira ordem, foi resolvida numericamente. Esta equação foi resolvida pelo método de Runge Kutta de 2 e 3 ordem implementado no pacote computacional MATLAB.

O experimento 3 ($P = 1,5 \text{ kgf/cm}^2$ e $\text{Conc} = 4\%$) foi realizado em triplicata (representado pelo experimento 4 e 5) para avaliação do desvio experimental dos parâmetros α e R_m . Na Tabela 1 e 2 já são apresentadas as médias desses parâmetros para os três experimentos. Os desvios foram de 19% para α e 6% para R_m . A Figura 34 apresenta um estudo da sensibilidade paramétrica nos resultados gerados pelo modelo. Pode-se observar que a mudança em α ocasiona uma mudança na inclinação da curva, mas a região não linear do gráfico é pouco afetada.

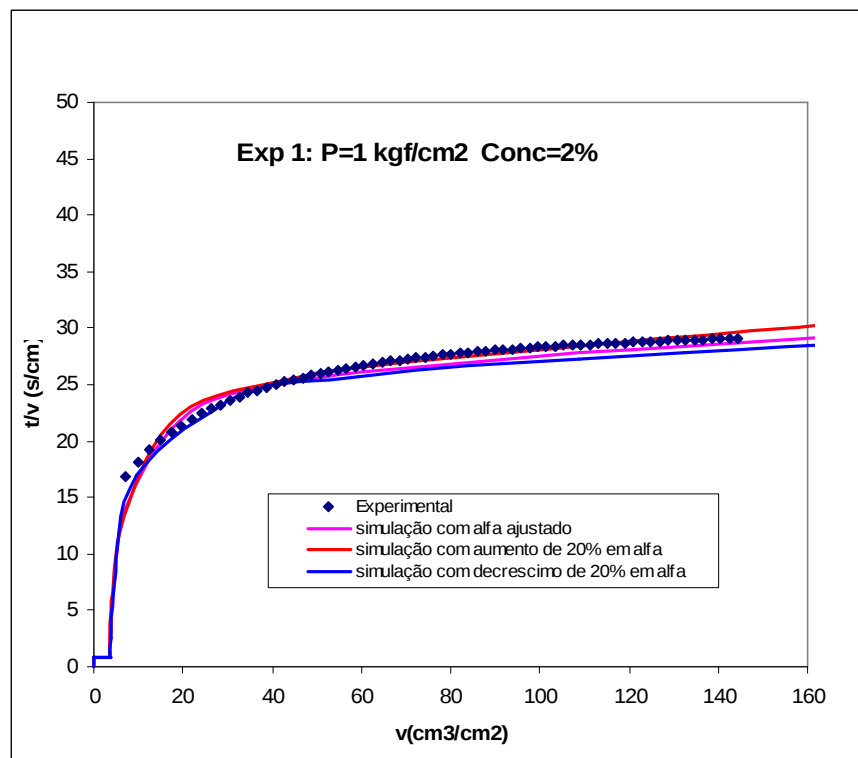


Figura 34: Análise de sensibilidade paramétrica em relação à resistividade da torta de filtração. (Experimento 1)

5 – CONCLUSÃO

Pelos resultados obtidos e para as condições operacionais trabalhadas pode-se concluir que as curvas de filtração obtidas apresentam comportamento esperado, ou seja, o aumento da pressão para uma mesma concentração ocasiona um aumento no volume de filtrado e o aumento da concentração, para uma mesma pressão, gera uma redução no volume obtido do mesmo.

Com relação aos valores de resistividade da torta, estes variam de acordo com o tipo de filtração realizado, inclusive na ordem de grandeza. Tal fato indica que o processo de formação da torta é influenciado pelo modo de filtração. Desta forma não é possível prever os valores de α para a filtração dinâmica, a partir de testes estáticos.

Para os valores de R_m , estes apresentam grande distinção quando obtidos no filtro HTHP, o que pode estar relacionado a própria estrutura da célula de filtração que permite que a suspensão fique sem agitação durante o ensaio ocasionando a sedimentação por gravidade.

Com relação aos resultados simulados, o modelo proposto por Ferreira e Massarani (2005) apresenta boa concordância com os resultados experimentais obtidos tanto no primeiro período onde o fluxo de permeado varia de forma não linear com o volume de filtrado, como no segundo período onde esta dependência é linear.

6- SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Um próximo passo seria realizar os ensaios de HTHP aqui apresentados utilizando uma mistura de glicerina e água para garantir a manutenção dos sólidos (carbonato de cálcio) em suspensão. Será necessário determinar qual a concentração de glicerina mínima a ser utilizada para evitar a rápida decantação do carbonato. Espera-se também que a viscosidade não altere a formação da estrutura da torta.
- É sugerido também aumentar a granulometria do carbonato de cálcio, para que se possa relacionar o tamanho das partículas com as propriedades da torta, buscando projetar fluido de perfuração que minimize a invasão do mesmo à formação rochosa.
- Também pode ser implementado em experimentos futuros a substituição do tecido de filtração por anéis (filtração cruzada) e discos (filtração plana) cerâmicos com permeabilidade próxima a de rochas reservatório e aumentar a pressão de filtração de forma a trabalhar em condições reais de operação no campo.
- Como última sugestão, será de grande importância a realização de todos os experimentos aqui apresentados utilizando um fluido Não-Newtoniano. Este é o tipo de fluido utilizado no processo de perfuração de poços de petróleo.

7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bezemer, C., and Havenaar, I., *SPE J.*, 1966, citado por: Jiao, D.; Sharma, M.M; “Mechanism of Cake Buildup in Crossflow Filtration of Colloidal Suspensions”, *Journal of colloid and interface science*, 162, 454-462, 1994.

Bourgoyne, A.T., Millheim, K.K., Chenevert, M.E., Young JR, F.S., “Applied drilling engineering”, Society of Petroleum Engineers, Richardson, TX, USA, Second Print, citado por: Scheid, C.M.; Martins, A.L.; Massarani, G.; “Escoamento axial de fluido não-Newtoniano em duto com paredes permeáveis”, 1991.

Carneiro, L., Sa, I.S., Gomes, F.S., Matta, V.M., Cabral, L.M.C., “Cold sterilization and clarification of pineapple juice by tangential microfiltration”, 2002, citado em: Nunes da Silva, I.; Flauzino, R.A.; “An approach based on neural networks for estimation end generalization of crossflow filtration processes”, *Applied Soft Computing*, 8, p. 590-598, 2008.

Choi, H., Zhang, K., Dionysiou, D.D., Oerther, D.B., Sorial, G.A., “Effect of permeate flux and tangential flow on membrane fouling for wastewater treatment”, 2005, citado em: Nunes da Silva, I.; Flauzino, R.A.; “An approach based on neural networks for estimation end generalization of crossflow filtration processes”, *Applied Soft Computing*, 8, p. 590-598, 2008.

Churchill, S.W., *Rev. Latino Am. Transf. Cal. Mat.* 7 (1983) 207–229, citado por, Ferreira, A.S., Massarani, G.; “Phisico-mathematical modeling of crossflow filtration”, *Chemical Engineering Journal*, 111, 199-204, 2005.

Connell, H.; Zhu, J.; Bassi, A.; “Effect of Particle Shape on Crossflow filtration flux”, *Journal of Membrane Science*, 153, p. 121-139, 1999.

Dornier, M., Gerbaudo, Y., Bennasar, M., “Clarification et Stabilisation du Vin de Palme par Filtration Tangentielle sur Membranes Minérales: Études des Conditions Opératoires, Industries Agricoles et alimentaires”, 1993, citado em: Nunes da Silva, I.; Flauzino, R.A.; “An approach based on neural networks for estimation end generalization of crossflow filtration processes”, *Applied Soft Computing*, 8, p. 590-598, 2008.

Ershaghi, I., Azari, M., "Modeling of Filter Cake Buildup Under Dynamic-Static Conditions", Society of Petroleum Engineers of AIME, SPE 8902, Los Angeles, CA, April 9-11, 1980.

Ferguson, C.F., and Klotz, J.A., *AIME Trans.*, 1954, citado por: Jiao, D.; Sharma, M.M; "Mechanism of Cake Buildup in Crossflow Filtration of Colloidal Suspensions", *Journal of colloid and interface science*, 162, 454-462, 1994.

Ferreira, A.S., Massarani, G.; "Phisico-mathematical modeling of crossflow filtration", *Chemical Engineering Journal*, 111, 199-204, 2005.

Fordham, E.J., Ladva, H.K.J., *PhysicoChemical Hydrodynamics*, 1989, citado por: Jiao, D.; Sharma, M.M; "Mechanism of Cake Buildup in Crossflow Filtration of Colloidal Suspensions", *Journal of colloid and interface science*, 162, 454-462, 1994.

Fordham, E.J., Ladva, H.K.J., Hall, C., Baret, J.F. and Sherwood, J.D. "Dynamic filtration of bentonite under different flow conditions", 1988, citado em: Jiao, D.; Sharma, M.M; "Mechanism of Cake Buildup in Crossflow Filtration of Colloidal Suspensions", *Journal of colloid and interface science*, 162, 454-462, 1994.

Fordham, E.J., Ladva, H.K.J., *J. Colloid Interface Sci*, 1992, citado por: Jiao, D.; Sharma, M.M; "Mechanism of Cake Buildup in Crossflow Filtration of Colloidal Suspensions", *Journal of colloid and interface science*, 162, 454-462, 1994.

Hafidi, A., "Soft purification of lampate olive oil by microfiltration", 2005, citado em: Nunes da Silva, I.; Flauzino, R.A.; "An approach based on neural networks for estimation end generalization of crossflow filtration processes", *Applied Soft Computing*, 8, p. 590-598, 2008.

Jiao, D.; Sharma, M.M; "Mechanism of Cake Buildup in Crossflow Filtration of Colloidal Suspensions", *Journal of colloid and interface science*, 162, 454-462, 1994.

Jiao, D., and Sharma, M.M., "Formation Damage due to static and dynamic filtration of water based Muds", 1992, citado em: Jiao, D.; Sharma, M.M; "Mechanism of Cake Buildup in Crossflow Filtration of Colloidal Suspensions", *Journal of colloid and interface science*, 162, 454-462, 1994.

Lawhon, C.P, Evans, W.M., Simpson, J.P.; “Laboratory Drilling rate and Filtration Studies of Emulsion Drilling fluids”, *Journal of Petroleum Technology*, Reprinted from July 1967, received from SPE 1695.

Lu, W.M., Ju, S.C., “Selective particle deposition in crossflow filtration”, 1989, citado em: Connell, H.; Zhu, J.; Bassi, A.; “Effect of Particle Shaper on Crossflow filtration flux”, *Journal of Membrane Science*, 153, p. 121-139, 1999.

Massarani, G.; “Filtração”, *Revista Brasileira de Engenharia*, Set. 1985.

Massarani, G., Silva Telles, A., Damasceno, J.J.R., “Evaluation of the Compression-Permeability Behavior of Sedments Subject to Small Deformations”, *Anais do 6th World Filtration Congress*, Nagoya, Japão, maio, 91-95, 1993.

Massarani, G.; “Fluidodinâmica em Sistemas Particulados”, 2^a edição, Rio de Janeiro, E-Papers Serviços Editoriais, 2002.

McCabe, W.L., Smith, J.C., Harriot, P.; “Unit Operations of Chemical Engineering” 5th Edition, McGraw-Hill International Editions, 1993.

MacCabe, W.L., Smith, J.C.; “Unit Operations of Chemical Engineering”, McGraw-Hill, Inc., Nova Iorque, 3^a edição, p. 938, 1976, citado por: Massarani, G.; “Filtração”, *Revista Brasileira de Engenharia*, Set. 1985.

Nunes da Silva, I.; Flauzino, R.A.; “An approach based on neural networks for estimation end generalization of crossflow filtration processes”, *Applied Soft Computing*, 8, p. 590-598, 2008.

O’Neill, M.E., *Chem. Eng. Sci* 23, 1923 (1968). citado em: Jiao, D.; Sharma, M.M; “Mechanism of Cake Buildup in Crossflow Filtration of Colloidal Suspensions”, *Journal of colloid and interface science*, 162, 454-462, 1994.

Outmans, H.D., *SPE J.*, 1963, citado por: Jiao, D.; Sharma, M.M; “Mechanism of Cake Buildup in Crossflow Filtration of Colloidal Suspensions”, *Journal of colloid and interface science*, 162, 454-462, 1994.

Peden, J.M., Arthur, K.G., Margarita Avalos. "The Analysis of Filtration Under Dynamic and Static Conditions", Society of Petroleum Engineers of AIME, SPE 12503, Bakersfield, CA, February 13-14, 1984.

Perry, J.H.; "Chemical engineer's handbook", R 660.2, P 463, 1953.

Ripperger, S., Altmann, J., "Crossflow microfiltration – state of the art", Separation Purification Technology, Dresden, Germany, 26 (2002) 19–31.

Roseiro, J.C., Conceição, A.C., Amaral-Collaco M.T., "Membrane concentration of fungal cellulases", 1993, citado em: Nunes da Silva, I.; Flauzino, R.A.; "An approach based on neural networks for estimation and generalization of crossflow filtration processes", *Applied Soft Computing*, 8, p. 590-598, 2008.

Ruiz, L.S.R., Mathematical models of water crossflow microfiltration process, 1994, citado em: Nunes da Silva, I.; Flauzino, R.A.; "An approach based on neural networks for estimation and generalization of crossflow filtration processes", *Applied Soft Computing*, 8, p. 590-598, 2008.

Shirato, M., Kobayashi, K., Tanimura, M., "Analysis of Constant Pressure Filtration of Compressible Cakes on Cylindrical Surface", *Kagaku*, 37, 1, 76, citado por: Massarani, G.; "Filtração", *Revista Brasileira de Engenharia*, Set. 1985.

Silva Telles, A., Massarani, G.; "Compactação de meios deformáveis: Uma descrição segundo a mecânica do contínuo", *Anais do X ABCM*, Rio de Janeiro, dezembro, vol.2, 13-16, 1989.

Souza, D.A.F.; Elias, R.N.; Alves, J.L.D.; Landau, L.; Coutinho, A.L.G.A.; Lomba, R.F.T., Martins, A.L.; "Modelagem computacional da prisão diferencial da coluna de perfuração em poços não convencionais", *SPE*, 2002.

Visser, J., *Adv. Colloid interface sci.*, 1972, citado por: Jiao, D.; Sharma, M.M; "Mechanism of Cake Buildup in Crossflow Filtration of Colloidal Suspensions", *Journal of colloid and interface science*, 162, 454-462, 1994.

Waldmann, A.; Andrade, A.R.; Martins, A.L.; Lomba, R.F.T.; Aragão, A.F.L.; "Sobre os Mecanismos Responsáveis por Minimizar a Invasão do Fluido de Perfuração na Rocha Reservatório", *ENAHPE 2006*, Pedra Azul, Domingos Martins, 29 a 31 de agosto de 2006.

Wu, M.L., Zall, R.R., Tzeng, W.C., “Microfiltration and ultrafiltration comparison for apple juice clarification”, 1990, citado por: Nunes da Silva, I.; Flauzino, R.A.; “An approach based on neural networks for estimation end generalization of crossflow filtration processes”, *Applied Soft Computing*, 8, p. 590-598, 2008.

8- ANEXOS

ANEXO 1 – Dados experimentais coletados nas unidades experimentais

Filtração Cruzada

Exp. 1		Exp. 2		Exp. 3	
v (cm ³ /cm ²)	t/v (s/cm)	v (cm ³ /cm ²)	t/v (s/cm)	v (cm ³ /cm ²)	t/v (s/cm)
3,438	17,450	5,280	11,363	3,238	18,530
6,489	18,493	11,155	10,757	6,573	18,257
9,216	19,531	13,650	13,187	9,417	19,115
11,756	20,415	17,101	14,034	12,092	19,847
14,219	21,099	20,430	14,685	14,600	20,548
16,578	21,716	23,596	15,257	17,075	21,083
18,814	22,324	26,653	15,758	19,434	21,611
21,044	22,810	29,620	16,205	21,826	21,993
23,254	23,222	32,470	16,631	24,152	22,358
25,400	23,622	35,314	16,990	26,460	22,676
27,532	23,972	38,087	17,329	28,722	22,979
29,594	24,329	40,827	17,635	31,003	23,224
31,682	24,620	43,522	17,922	33,213	23,484
33,750	24,889	46,204	18,180	35,391	23,735
35,715	25,200	48,789	18,447	37,557	23,964
37,718	25,452	51,381	18,684	39,715	24,172
39,741	25,666	53,979	18,896	41,835	24,381
41,725	25,884	56,564	19,093	43,961	24,567
43,683	26,097	59,091	19,292	46,036	24,763
45,642	26,292	61,612	19,477	48,098	24,949
47,600	26,471	64,126	19,649	50,127	25,136
49,545	26,642	66,563	19,831	52,118	25,327
51,465	26,814	69,090	19,974	54,134	25,492
53,365	26,984	71,526	20,132	56,099	25,669
55,304	27,123	74,008	20,268	58,044	25,842
57,230	27,258	76,503	20,391	59,951	26,021
59,124	27,400	78,959	20,517	61,838	26,197
61,037	27,524	81,415	20,635	63,719	26,366
62,963	27,635	83,832	20,756	65,541	26,548
64,850	27,756	86,275	20,864	67,364	26,721
66,750	27,865	88,744	20,959	69,141	26,901
68,663	27,963	91,193	21,054	70,919	27,073
70,511	28,081	93,662	21,140	72,677	27,244
72,399	28,177	96,092	21,230	74,409	27,416
74,286	28,269	98,522	21,315	76,115	27,590
76,199	28,347	100,939	21,399	77,808	27,761
78,093	28,428	103,369	21,476	79,476	27,933
79,967	28,512	105,793	21,552	81,137	28,101
81,867	28,583	108,223	21,622	82,785	28,266
83,741	28,660	110,666	21,687	84,400	28,436
85,616	28,733	113,096	21,751	85,977	28,612
87,470	28,810	115,526	21,813	87,574	28,776
89,371	28,869	117,924	21,878	89,144	28,942
91,232	28,937	120,348	21,936	90,689	29,110
93,113	28,997	122,797	21,987	92,234	29,273
95,000	29,053	125,227	22,040	93,752	29,439
96,874	29,110	127,644	22,093	95,258	29,604
98,748	29,165	130,094	22,138	96,764	29,763
100,610	29,222	132,543	22,181	98,251	29,923

102,497	29,269	134,948	22,231	99,698	30,091
104,358	29,322	137,378	22,274	101,159	30,249
106,233	29,370	139,776	22,322	102,594	30,411
108,107	29,415	142,238	22,357	103,996	30,578
109,975	29,461	144,662	22,397	105,412	30,737
111,855	29,502	147,085	22,436	106,821	30,893
113,743	29,540	149,522	22,472	108,197	31,054
115,591	29,587	151,939	22,509	109,567	31,214
117,472	29,624	154,375	22,542	110,925	31,373
119,391	29,650	156,825	22,573	112,275	31,530
121,253	29,690	159,249	22,606	113,607	31,688
123,107	29,730	161,730	22,630	114,912	31,850
124,988	29,763	164,148	22,663	116,224	32,007
126,875	29,793	166,604	22,689	117,517	32,166
128,737	29,828	169,014	22,720	118,803	32,322
130,624	29,857	171,483	22,743	120,070	32,481
132,505	29,886	173,939	22,767	121,343	32,635
134,392	29,913	176,395	22,790	122,597	32,790
136,253	29,944	178,838	22,814	123,831	32,948
138,121	29,974	181,300	22,835	125,066	33,103
139,995	30,001	183,763	22,856	126,274	33,261

Exp. 4		Exp. 5		Exp. 6	
$v \text{ (cm}^3/\text{cm}^2)$	$t/v \text{ (s/cm)}$	$v \text{ (cm}^3/\text{cm}^2)$	$t/v \text{ (s/cm)}$	$v \text{ (cm}^3/\text{cm}^2)$	$t/v \text{ (s/cm)}$
3,238	18,530	3,354	17,887	3,076	19,503
6,663	18,009	6,734	17,819	5,713	21,004
9,417	19,115	9,598	18,755	8,040	22,388
12,002	19,997	12,286	19,534	10,321	23,253
14,497	20,695	14,755	20,332	12,506	23,989
16,914	21,285	17,159	20,980	14,652	24,571
19,208	21,866	19,454	21,590	16,927	24,813
21,548	22,276	21,780	22,038	18,950	25,330
23,849	22,643	24,081	22,424	20,992	25,724
26,098	22,991	26,343	22,776	23,002	26,085
28,321	23,304	28,592	23,083	24,992	26,408
30,518	23,592	30,809	23,370	26,938	26,728
32,651	23,889	33,013	23,627	28,857	27,030
34,758	24,167	35,204	23,861	30,770	27,299
36,878	24,405	37,337	24,105	32,664	27,553
38,946	24,649	39,483	24,315	34,512	27,816
41,001	24,877	41,622	24,506	36,348	28,062
43,037	25,095	43,722	24,701	38,177	28,289
45,067	25,296	45,842	24,868	40,013	28,491
47,070	25,494	47,943	25,030	41,829	28,688
49,035	25,696	50,024	25,188	43,625	28,882
50,974	25,896	52,001	25,384	45,422	29,061
52,945	26,065	54,024	25,544	47,212	29,230
54,884	26,237	56,067	25,684	48,990	29,394
56,810	26,404	58,064	25,834	50,773	29,543
58,749	26,554	60,061	25,974	52,525	29,700
60,597	26,734	62,032	26,116	54,263	29,854
62,459	26,898	63,984	26,257	56,015	29,992
64,320	27,052	65,929	26,392	57,753	30,128
66,155	27,209	67,842	26,532	59,453	30,276
67,946	27,375	69,749	26,667	61,172	30,406
69,736	27,532	71,636	26,802	62,853	30,548
71,552	27,672	73,368	26,987	64,546	30,676

73,323	27,822	75,372	27,066	66,220	30,806
75,068	27,975	77,201	27,202	67,868	30,942
76,839	28,111	79,023	27,334	69,529	31,066
78,558	28,259	80,839	27,462	71,138	31,207
80,290	28,397	82,643	27,589	72,761	31,336
81,996	28,538	84,426	27,716	74,370	31,464
83,683	28,680	86,210	27,839	75,953	31,598
85,376	28,814	87,987	27,959	77,550	31,722
87,044	28,951	89,745	28,079	79,107	31,855
88,692	29,089	91,490	28,200	80,678	31,979
90,353	29,219	93,203	28,325	82,222	32,108
91,982	29,354	94,935	28,440	83,748	32,240
93,636	29,476	96,628	28,563	85,279	32,364
95,226	29,614	98,335	28,678	86,772	32,499
96,835	29,741	99,989	28,803	88,265	32,629
98,419	29,872	101,624	28,930	89,752	32,757
100,009	29,997	103,298	29,042	91,245	32,879
101,573	30,126	104,953	29,156	92,686	33,015
103,117	30,257	106,575	29,275	94,134	33,144
104,668	30,382	108,178	29,396	95,569	33,275
106,220	30,503	109,787	29,512	96,984	33,408
107,745	30,628	111,390	29,626	98,393	33,539
109,270	30,749	112,973	29,742	99,795	33,669
110,789	30,870	114,563	29,852	101,178	33,802
112,282	30,993	116,114	29,970	102,574	33,927
113,762	31,118	117,679	30,082	103,932	34,061
115,235	31,240	119,230	30,194	105,282	34,194
116,716	31,358	120,768	30,306	106,640	34,321
118,163	31,482	122,287	30,420	107,939	34,464
119,617	31,601	123,812	30,530	109,290	34,587
121,052	31,722	125,318	30,642	110,576	34,727
122,481	31,842	126,804	30,756	111,901	34,852
123,902	31,961	128,284	30,869	113,174	34,990
125,247	32,097	129,771	30,978	114,473	35,117
126,701	32,202	131,154	31,108	115,733	35,254
128,103	32,318	132,705	31,197	116,993	35,387
129,467	32,441	134,146	31,309	118,228	35,525

Exp. 7		Exp. 8		Exp. 9	
$v \text{ (cm}^3/\text{cm}^2)$	$t/v \text{ (s/cm)}$	$v \text{ (cm}^3/\text{cm}^2)$	$t/v \text{ (s/cm)}$	$v \text{ (cm}^3/\text{cm}^2)$	$t/v \text{ (s/cm)}$
4,712	12,735	2,676	22,424	4,712	12,735
8,021	14,961	5,397	22,236	8,447	14,206
10,845	16,598	7,801	23,074	11,627	15,481
13,508	17,768	10,063	23,850	14,555	16,490
16,119	18,612	12,222	24,547	17,334	17,307
18,607	19,348	14,322	25,136	19,964	18,032
21,115	19,891	16,397	25,615	22,601	18,583
23,577	20,359	18,413	26,068	25,212	19,038
26,027	20,748	20,397	26,474	27,765	19,449
28,476	21,070	22,349	26,847	30,305	19,799
30,913	21,351	24,301	27,159	32,832	20,102
33,323	21,607	26,233	27,446	35,295	20,400
35,689	21,856	28,140	27,719	37,750	20,662
38,080	22,059	30,040	27,963	40,213	20,889
40,458	22,245	31,921	28,195	42,701	21,077
42,837	22,411	33,789	28,412	45,144	21,265
45,202	22,565	35,624	28,632	47,594	21,431

47,561	22,708	37,460	28,831	50,062	21,573
49,907	22,842	39,269	29,030	52,480	21,723
52,202	22,988	41,098	29,198	54,897	21,859
54,528	23,107	42,901	29,370	57,308	21,987
56,887	23,204	44,698	29,531	59,744	22,094
59,240	23,295	46,495	29,681	62,161	22,200
61,573	23,387	48,272	29,831	64,559	22,305
63,926	23,465	50,037	29,978	66,983	22,394
66,265	23,542	51,795	30,119	69,374	22,487
68,573	23,625	53,546	30,254	71,765	22,574
70,919	23,689	55,278	30,392	74,176	22,649
73,252	23,754	56,997	30,528	76,593	22,717
75,591	23,812	58,729	30,649	79,010	22,782
77,937	23,865	60,442	30,773	81,376	22,857
80,271	23,919	62,122	30,907	83,851	22,898
82,610	23,968	63,816	31,027	86,262	22,953
84,918	24,023	65,496	31,147	88,673	23,006
87,277	24,061	67,164	31,267	91,064	23,061
89,603	24,106	68,812	31,390	93,475	23,108
91,949	24,144	70,434	31,519	95,885	23,153
94,289	24,181	72,069	31,636	98,264	23,203
96,648	24,212	73,678	31,760	100,681	23,242
98,975	24,249	75,301	31,872	103,040	23,292
101,282	24,289	76,806	32,029	105,405	23,338
103,628	24,318	78,487	32,107	107,809	23,375
105,942	24,353	80,051	32,230	110,227	23,406
108,288	24,379	81,615	32,347	112,650	23,435
110,589	24,415	83,166	32,465	115,003	23,478
112,948	24,436	84,711	32,581	117,536	23,482
115,268	24,465	86,236	32,701	119,798	23,540
117,607	24,488	87,742	32,824	122,177	23,572
119,915	24,517	89,280	32,930	124,568	23,602
122,248	24,540	90,779	33,047	126,959	23,630
124,555	24,567	92,266	33,165	129,357	23,655
126,895	24,587	93,765	33,275	131,781	23,676
129,247	24,604	95,245	33,387	134,114	23,711
131,561	24,627	96,719	33,499	136,557	23,726
133,888	24,648	98,167	33,616	138,929	23,753
136,214	24,667	99,608	33,732	141,320	23,776
138,515	24,690	101,056	33,843	143,731	23,794
140,868	24,704	102,471	33,961	146,142	23,813
143,201	24,721	103,899	34,071	148,533	23,833
145,521	24,739	105,295	34,190	150,950	23,849
147,854	24,754	106,711	34,298	153,341	23,868
150,168	24,772	108,087	34,417	155,733	23,887
152,501	24,787	109,458	34,534	158,150	23,901
154,815	24,804	110,821	34,650	160,574	23,914
157,174	24,813	112,178	34,766	162,978	23,930
159,507	24,826	113,523	34,883	165,395	23,943
161,834	24,840	114,854	35,001	167,812	23,955
164,160	24,854	116,186	35,116	170,229	23,968
166,494	24,866	117,491	35,237	172,621	23,983
168,820	24,879	118,797	35,355	175,038	23,995

Filtro Folha

Exp. 1		Exp. 6		Exp. 8	
V (cm ³ /cm ²)	t/V (s/cm)	V (cm ³ /cm ²)	t/V (s/cm)	V(cm ³ /cm ²)	t/V (s/cm)

9,632	46,198	7,706	86,167	7,706	62,030
11,559	46,804	9,632	88,763	9,632	63,432
13,485	46,717	11,559	90,147	11,559	63,760
15,412	48,339	13,485	91,877	13,485	65,775
17,338	49,716	15,412	93,759	15,412	67,286
19,265	50,974	17,338	96,030	17,338	67,827
21,191	52,050	19,265	97,795	19,265	70,439
23,118	53,855	21,191	99,286	21,191	71,775
25,044	55,262	23,118	100,702	23,118	73,493
26,971	56,839	25,044	102,179	25,044	74,468
-	-	26,971	102,593	26,971	74,970

Filtração Sob Pressão

Exp. 1		Exp. 2		Exp. 3	
V (cm ³ /cm ²)	t/V (s/cm)	V (cm ³ /cm ²)	t/V (s/cm)	V(cm ³ /cm ²)	t/V (s/cm)
2,757	10,882	4,521	6,635	2,867	10,463
5,183	11,576	8,271	7,254	5,073	11,828
7,278	12,365	11,359	7,923	6,948	12,954
9,043	13,270	14,005	8,568	8,602	13,951
10,807	13,880	16,431	9,129	10,146	14,785
12,351	14,574	18,637	9,658	11,469	15,695
13,785	15,234	20,732	10,129	12,792	16,416
15,218	15,770	22,717	10,565	13,895	17,272
16,652	16,214	24,592	10,979	15,108	17,871
17,865	16,793	26,246	11,430	16,101	18,633
19,078	17,297	27,900	11,828	17,093	19,306
20,291	17,742	29,554	12,181	18,086	19,905
21,394	18,229	31,098	12,541	19,078	20,442
22,497	18,669	32,532	12,910	19,960	21,042
23,599	19,068	33,966	13,249	20,843	21,590
24,592	19,519	35,399	13,560	21,614	22,207
25,584	19,934	36,723	13,888	22,497	22,670
26,577	20,318	38,046	14,193	23,269	23,207
27,459	20,758	39,369	14,478	24,041	23,710
28,452	21,088	40,582	14,785	24,702	24,289
29,334	21,477	41,906	15,034	25,474	24,731
30,216	21,843	43,119	15,307	26,246	25,147
31,098	22,188	44,221	15,603	26,908	25,643
31,981	22,514	45,434	15,847	27,569	26,116
32,753	22,899	46,537	16,116	28,231	26,566
33,635	23,190	47,640	16,373	28,893	26,996
34,517	23,467	48,743	16,618	29,554	27,407
35,179	23,878	49,846	16,852	30,216	27,800

Exp. 6		Exp. 7		Exp. 8	
V (cm ³ /cm ²)	t/V (s/cm)	V (cm ³ /cm ²)	t/V (s/cm)	V(cm ³ /cm ²)	t/V (s/cm)
2,206	13,602	3,088	9,716	2,536	11,828
3,749	16,002	5,183	11,576	4,521	13,270
4,963	18,136	6,837	13,163	6,176	14,574

6,065	19,785	8,271	14,509	7,609	15,770
7,058	21,253	9,594	15,634	8,822	17,003
8,050	22,359	10,807	16,656	9,925	18,136
8,933	23,510	11,910	17,632	11,028	19,043
9,594	25,015	12,903	18,601	12,020	19,966
10,366	26,046	13,785	19,587	13,013	20,749
11,138	26,935	14,777	20,301	13,895	21,590
11,800	27,967	15,549	21,223	14,667	22,500
12,351	29,147	16,431	21,909	15,439	23,318
13,013	29,971	17,203	22,670	16,211	24,058
13,564	30,964	17,975	23,365	16,983	24,731
14,226	31,633	18,747	24,004	17,755	25,345
14,777	32,482	19,409	24,731	18,416	26,064
15,218	33,512	20,071	25,410	19,078	26,732
15,770	34,243	20,732	26,046	19,740	27,356
16,321	34,924	21,394	26,643	20,401	27,939
16,762	35,795	22,056	27,204	21,063	28,486
17,314	36,388	22,717	27,732	21,614	29,147
17,755	37,173	23,269	28,364	22,166	29,776
18,196	37,921	23,820	28,967	22,828	30,227
18,637	38,633	24,482	29,410	23,379	30,797
19,078	39,312	25,033	29,960	23,930	31,341
19,519	39,961	25,584	30,487	24,482	31,861
19,960	40,581	26,136	30,992	25,033	32,357
20,401	41,174	26,687	31,476	25,474	32,975

Exp. 9	
V (cm ³ /cm ²)	t/V (s/cm)
4,301	6,975
7,168	8,370
9,484	9,490
11,359	10,565
13,123	11,430
14,667	12,272
15,990	13,133
17,314	13,862
18,637	14,487
19,740	15,198
20,843	15,833
21,945	16,404
22,938	17,003
23,820	17,632
24,813	18,136
25,695	18,681
26,577	19,190
27,349	19,745
28,231	20,190
29,003	20,687
29,775	21,159
30,547	21,606
31,319	22,031
31,981	22,514
32,753	22,899
33,414	23,343

34,076	23,770
34,738	24,181

Filtração HTHP

Exp. 1		Exp. 2		Exp. 3	
V (cm ³ /cm ²)	t/V (s/cm)	V (cm ³ /cm ²)	t/V (s/cm)	V (cm ³ /cm ²)	t/V (s/cm)
0,202	89,258	0,202	0,000	0,202	0,000
0,403	101,654	0,403	61,984	0,403	91,737
0,605	104,134	0,605	77,687	0,605	100,828
0,807	106,613	0,807	85,538	0,807	111,572
1,008	108,101	1,008	89,258	1,008	121,985
1,210	109,919	1,210	94,216	1,210	129,754
1,412	111,926	1,412	97,050	1,412	135,303
1,613	112,812	1,613	99,175	1,613	138,845
1,815	114,051	1,815	101,379	1,815	143,253
2,017	115,043	2,017	102,646	2,017	146,283
2,218	116,756	2,218	104,134	2,218	146,509
2,420	116,944	2,420	105,787	2,420	149,176
2,622	117,484	2,622	106,804	2,622	151,433
2,823	117,593	2,823	106,967	2,823	152,659
3,025	118,018	3,025	108,101	3,025	154,382
3,227	118,080	3,227	108,473	3,227	155,271
3,428	118,427	3,428	109,384	-	-
3,630	118,459	3,630	110,194	-	-
3,832	119,010	-	-	-	-
4,033	119,010	-	-	-	-

Exp. 6		Exp. 7		Exp. 8	
V (cm ³ /cm ²)	t/V (s/cm)	V (cm ³ /cm ²)	t/V (s/cm)	V (cm ³ /cm ²)	t/V (s/cm)
0,202	128,928	0,202	44,629	0,202	178,515
0,403	151,242	0,403	71,902	0,403	203,309
0,605	176,862	0,605	82,646	0,605	224,797
0,807	185,953	0,807	88,018	0,807	240,499
1,008	198,350	1,008	93,225	1,008	261,822
1,210	213,226	1,210	97,522	1,210	276,037
1,412	223,144	1,412	101,300	1,412	291,858
1,613	235,541	1,613	104,754	1,613	303,723
1,815	250,141	1,815	107,991	1,815	310,197
2,017	262,318	2,017	110,084	2,017	317,360
2,218	273,633	2,218	111,797	2,218	324,573
2,420	283,062	2,420	114,464	2,420	329,344
2,622	294,092	2,622	117,103	2,622	334,906
2,823	301,421	2,823	118,656	2,823	336,841
3,025	306,781	3,025	120,994	3,025	339,179
-	-	3,227	122,729	3,227	341,534
-	-	3,428	124,260	3,428	345,071
-	-	3,630	125,897	3,630	346,011
-	-	3,832	127,101	3,832	348,417
-	-	4,033	128,432	4,033	350,088

Exp. 9	
V (cm ³ /cm ²)	t/V (s/cm)

0,202	69,423
0,403	74,381
0,605	79,340
0,807	80,580
1,008	84,299
1,210	88,431
1,412	92,091
1,613	95,456
1,815	98,624
2,017	101,159
2,218	105,035
2,420	106,613
2,622	109,093
2,823	110,509
3,025	111,737
3,227	112,812
3,428	114,051
3,630	114,878
3,832	115,878
4,033	116,531

ANEXO 2 – Trabalhos publicados durante a dissertação

AValiação DE PARâMETROS NO ESTUDO DA FILTRAÇÃO PLANA E CRUZADA

Cláudia Miriam Scheid¹, Luís Américo Calçada¹, Cristiano Agenor O. de Araújo¹, Sérgio da Cruz Magalhães Filho¹, André Leibsohn Martins²

¹Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Química, BR 465, Km 7, Seropédica, RJ, CEP: 23890-000, E-mail: calcada@ufrj.br e scheid@ufrj.br

²PETROBRAS S.A./CENPES/PDP/TEP, Av. Hum Quadra 07, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, CEP 21494-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

RESUMO

Na perfuração e completção de poços de petróleo, o fluido de perfuração ao escoar pela região anular invade a formação levando ao crescimento de uma torta na parede do poço, podendo comprometer a avaliação do reservatório, durante a testemunhagem, e causar danos irreversíveis ao mesmo. Dentro deste contexto, foram construídas duas unidades de filtração, uma cruzada e outra plana, para avaliação dos parâmetros da filtração como resistividade média da torta, resistência do meio filtrante, tempo de filtração e volume de filtrado. Os estudos foram conduzidos com suspensões de carbonato de cálcio. A unidade de filtração cruzada foi constituída de um tanque com agitação, tubos de PVC, bomba de deslocamento positivo, sendo utilizado tecido de filtração como meio filtrante. Em uma segunda etapa, foi proposto um modelo para avaliação do processo de filtração com formação de torta nas paredes do meio filtrante a partir do escoamento axial e radial do fluido. O modelo baseia-se em equações fenomenológicas a partir de balanços das propriedades conservativas massa e quantidade de movimento que levam à equação da filtração. Para o escoamento radial, direção onde ocorre a filtração, o escoamento é considerado no regime de Darcy. O modelo permite considerar o efeito do perfil de pressão na direção axial no processo de filtração e ainda, é possível levar em conta os efeitos de compressibilidade da torta a partir de equações constitutivas para a porosidade e pressão dos sólidos. Como restrição ao crescimento da torta, considera-se o efeito da tensão cisalhante oriunda do escoamento na direção axial, realizado a partir de testes de clássicos na mecânica dos solos. A estabilidade da torta na filtração cruzada está associada à quebra do equilíbrio de Coulomb na superfície da torta em contato com a suspensão.

Perfuração, invasão e formação rochosa.

1. INTRODUÇÃO

O completo domínio da tecnologia de exploração de petróleo é sem dúvida um objetivo claro a ser seguido pelas grandes corporações petrolíferas. Em um mundo globalizado e competitivo, a otimização de tal processo é uma busca incessante que tem como objetivo maior lucratividade e competitividade. O panorama nacional é bastante promissor, com recentes descobertas de grandes reservas de petróleo, o Brasil pode ascender na competitividade mundial, a energia move um país e a exploração de petróleo é o ícone da energia mundial.

Objetivando estudar o processo da filtração cruzada que está presente nas etapas de perfuração de poços petróleo, este trabalho dispõe-se a avaliar a unidade construída, os meios filtrante, os resultados provenientes do processo da filtração em si, além de apresentar um modelo para a avaliação do processo de filtração com formação de torta. A avaliação consiste na coleta dos dados experimentais como pressão de filtração, volume de filtrado, diferencial de pressão no meio poroso, concentração da suspensão e vazão de retido.

A filtração ocorre com formação de torta nas paredes do meio poroso, com escoamento nas direções axial e radial, sendo, a filtração, presente na direção radial como mostra a figura 1. O processo ocorre na região anular entre a parede da formação rochosa, que nesse caso é o meio poroso em questão, e a parede externa da coluna de perfuração, figura 2.

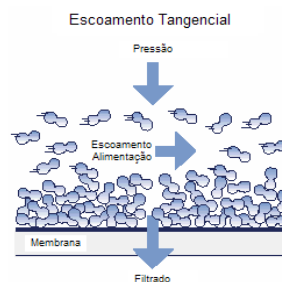


Figura 1: O processo da filtração cruzada.

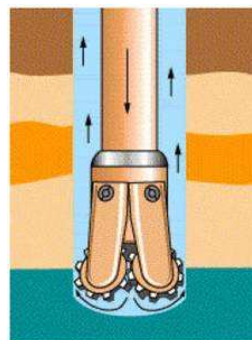


Figura 2: Região anular onde ocorre a filtração cruzada.

O ponto chave do projeto é o conhecimento quantitativo do fenômeno para a proposta de condições operacionais ótimas, visando minimizar a invasão de fluido na formação rochosa, o que pode danificar irreversivelmente o poço em questão. O conhecimento de novas técnicas operacionais que possam proporcionar mais segurança, agilidade e produtividade ao processo, são de extrema importância para o desenvolvimento da tecnologia de perfuração.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A filtração cruzada resulta do escoamento axial de uma suspensão através de um duto, o qual as paredes são constituídas de um material filtrante, conduzindo a formação de um depósito sobre a superfície e a produção de um filtrado que percola através da mesma. Caracteristicamente, o escoamento do filtrado com o tempo pode estabilizar, em uma operação longa, como consequência da ação do mecanismo que limita a formação da torta. A filtração com formação de torta constitui-se num problema de mecânica dos fluidos no qual o fluido escoar através de um meio poroso, a torta, que cresce e se deforma continuamente.

A filtração cruzada é empregada na indústria como clarificante de suspensões e na concentração de suspensões em uma larga faixa de aplicações que empregam a tecnologia de membranas. A operação de preparação e perfuração dos poços de óleos envolve essencialmente o mesmo fenômeno que prevalece na

filtração cruzada com micro-membranas. É o escoamento axial de uma suspensão não-Newtoniana no espaço anular entre um cilindro de rotação e a formação do petróleo. Nessa situação, as propriedades e a espessura do depósito que é formado permitem o controle da invasão danificante do fluido de perfuração na formação do petróleo (FERREIRA & MASSARANI, 2005).

As propriedades da torta dependem de inúmeros fatores de difícil quantificação, como da físico-química da suspensão sólido-fluido, da colmatagem causada pela migração das partículas de pequenas dimensões através da torta e da história do processo deformatório imposta pelo escoamento do fluido sobre a matriz sólida, o que significa que a configuração e as condições de operação do filtro afetam as características da torta nele produzida (MASSARANI, 1985).

A maior dificuldade na análise científica da filtração não reside propriamente na solução das equações não lineares resultantes da aplicação dos princípios básicos de conservação para este problema transiente e de contorno móvel, e sim da informação imperfeita e duvidosa transmitida pelas equações constitutivas. Esta análise evidencia, no entanto, os pontos obscuros da filtração, ajudam a interpretar e quantificar alguns fenômenos e permite vislumbrar as novas tendências no campo da separação sólido-fluido.

A determinação experimental dos parâmetros da filtração plana à pressão constante pode ser feita através da equação 1 (MASSARANI, 2002), onde os valores de $\langle \alpha \rangle$ e R_m resultam da dependência linear entre t/V e V ,

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu_F}{A(\Delta p)} \left[\frac{\langle \alpha \rangle C \rho_F V}{2A} + R_m \right]$$

(1)

onde t é o tempo de filtração, μ_F a viscosidade do fluido, A a área de filtração, Δp a queda de pressão, $\langle \alpha \rangle$ a resistividade média da torta, ρ_F a densidade do fluido, V o volume de filtrado, C a concentração da suspensão e R_m a resistência do meio filtrante.

Um modelamento físico-matemático da filtração cruzada em coordenadas cilíndricas é proposto por FERREIRA & MASSARANI (2005), que resulta do escoamento axial da suspensão em tubos, que foram feitos com um meio poroso usado na filtração industrial. O modelamento é feito com base na equação da continuidade e do movimento para as fases, e teve como objetivo estabelecer a relação entre o campo de pressão, o escoamento do filtrado e a espessura da torta ao longo do processo. O modelo considera o período de crescimento da torta, com a concomitante redução na taxa de filtração e o estágio na qual a espessura da torta e o escoamento do filtrado pode estabilizar ao longo da operação, na qual o filtro funciona como um espessante.

O passo inicial da filtração cruzada é caracterizado pelo crescimento da torta que é formada próximo ao meio filtrante. As equações de conservação de massa para a fase e do movimento do fluido, na forma da equação de Darcy, conduz a equação para a filtração cruzada sobre uma superfície cilíndrica (FERREIRA & MASSARANI, 2005).

$$\frac{dt}{dv} = \frac{\mu_F}{(\Delta p)_f} \left\{ \alpha \varepsilon_s \rho_s r_t \ln \frac{r_t}{\left[r_t^2 - \frac{2c \rho_F r_t v}{\varepsilon_s \rho_s} \right]^{1/2}} + R_m \right\}$$

(2)

onde t é o tempo de filtração e v o volume de filtrado por unidade de área de filtração,

$$v = \frac{1}{2\pi r_t} \frac{dv}{dz}$$

(3)

A resistividade α e a fração volumétrica de sólidos ε_s , médias em cada sessão do filtro, variam não somente com a pressão de filtração no local, mas também com a estrutura da torta que é depositada.

A espessura da torta e o volume total de filtrado podem ser calculados através das expressões (4) e (5).

$$\ell(z, t) = r_t - \left[r_t^2 - \frac{2c r_t v(z, t)}{\varepsilon_s \rho_s} \right]^{1/2}$$

(4)

$$V(t) = \pi D_t \int_0^L v(z, t) dz$$

(5)

Integrando a equação (2) a relação entre volume de filtrado com o tempo de filtração quando o fluido que percola é Newtoniano pode ser escrita pela equação 6.

$$t = \frac{\mu_F}{(\Delta p)_f} \left\{ \alpha \varepsilon_s \rho_s r_t \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b^n}{2n(n+1)r_t^{2n}} v^n + R_m \right\} v$$

(6)

Onde,

$$b = \frac{2c\rho_F r_t}{\varepsilon_s \rho_s}$$

t é o tempo de filtração, μ_F a viscosidade do fluido, α a resistividade da torta, ε a porosidade da torta, Δp a queda de pressão, c a concentração da suspensão, ρ_F e ρ_s a densidade do fluido e sólido respectivamente, r_t o raio do tubo, v o volume de filtrado e R_m a resistência do meio filtrante.

3. Modelo Proposto

Modelamento matemático da filtração cruzada para fluido não-Newtoniano

Assumindo que o fluido não Newtoniano segue o modelo da potência, ele pode ser representado pela Equação (7).

$$\tau(\lambda) = M \cdot \lambda^n$$

(7)

onde, τ é a tensão cisalhante, M o índice de consistência e n o índice de comportamento do fluido e λ^* a taxa de deformação.

A viscosidade efetiva μ_{ef} pode ser calculada pela Equação (8). Sendo a taxa de deformação característica λ^* para os escoamentos no meio poroso filtrante e na torta, segundo a Equação (9).

$$\mu_{ef} = \frac{\tau(\lambda^*)}{\lambda^*},$$

(8)

$$\lambda^* = \frac{q}{\sqrt{k}}$$

(9)

onde k é a permeabilidade.

A partir das Equações (7) e (9) em (8), pode-se calcular a viscosidade efetiva do fluido em função da velocidade q_r , segundo a Equação (10).

$$\mu_{ef} = M \cdot \left(\frac{q_r}{\sqrt{k}} \right)^{n-1}$$

(10)

A equação do movimento para o fluido que percola a torta na direção radial é dada pela Equação (11).

$$-\frac{dP}{dr} = \frac{\mu_{ef}}{k} \cdot q_r$$

(11)

A equação do movimento para o fluido que percola o meio filtrante,

$$-\frac{dP}{dr} = \frac{\mu}{k_m} \cdot q_m$$

(12)

Pode-se estabelecer uma relação entre a concentração da suspensão e o raio r que caracteriza o início da torta e o raio r_m que caracteriza o raio interno do meio filtrante.

$$c = \frac{\varepsilon_s \cdot \rho_s \cdot L \cdot \pi \cdot (r_m^2 - r^2)}{(2 \cdot \pi \cdot r_m \cdot L) \cdot v(z,t) \cdot \rho} = \frac{\varepsilon_s \cdot \rho_s \cdot L \cdot (r_m^2 - r^2)}{(2 \cdot r_m \cdot L) \cdot v(z,t) \cdot \rho}$$

(13)

onde c é a concentração da suspensão, ε_s é a porosidade da torta, ρ_s é a densidade do sólido, r_m é o raio do meio filtrante e r a distância do centro do tubo até o início da torta e $v(z,t)$ é a variação do volume de filtrado por unidade de área de filtração, segundo a equação

$$v(z,t) = \frac{dV(t)}{dA}, \text{ ver figura 3.}$$

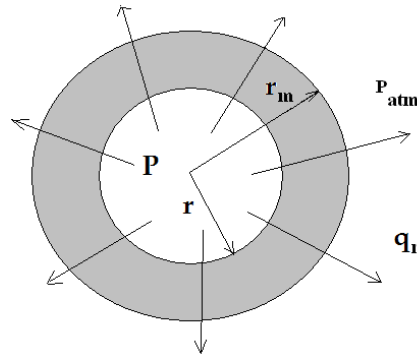


Figura 3: Esquema representativo da filtração com formação de torta de espessura $e = r_m - r$.

Da Equação (13) é possível obter uma expressão para o raio r da torta em função de z e t

$$r = \left(r_m^2 - \frac{2 \cdot c \cdot \rho \cdot r_m \cdot v(z,t)}{\epsilon_s \cdot \rho_s} \right) \quad (14)$$

Substituindo a Equação (10) na Equação (11), obtém-se a Equação (15).

$$-\frac{dP}{dr} = \frac{M}{k^{\frac{n+1}{2}}} \cdot q_r^n \quad (15)$$

Definindo segundo a Equação (16),

$$q_r = \frac{dQ_f}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot dz} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r} \frac{dQ_f}{dz} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot Q_f^* \quad (16)$$

Levando a Equação (16) em (17),

$$-\frac{dP}{dr} = \frac{M}{k^{\frac{n+1}{2}}} \cdot \left(\frac{Q_f^*}{2 \cdot \pi \cdot r} \right)^n \quad (17)$$

Rearranjando Equação (17) em r , obtém-se a Equação (18).

$$-dP = \frac{M}{k^{\frac{n+1}{2}}} \cdot \left(\frac{Q_f^*}{2 \cdot \pi} \right)^n \frac{dr}{r^n} \quad (18)$$

Integrando a Equação (18) em r , obtém-se a Equação (19).

$$P - P_m = \frac{M}{k^{\frac{n+1}{2}}} \cdot \left(\frac{Q_f^*}{2 \cdot \pi \cdot r_m^n} \right)^n \cdot r_m^n \cdot \left(\frac{r_m^{1-n} - r^{1-n}}{1-n} \right) \quad (19)$$

Substituindo a Equação (14) na Equação (19) e sabendo que $\frac{Q_f^*}{2 \cdot \pi \cdot r_m} = \frac{dv(z,t)}{dt}$, na parede interna do meio filtrante obtém-se a Equação (20).

$$P - P_m = \frac{M}{k^{\frac{n+1}{2}}} \left(\frac{dv}{dt} \right)^n \cdot r_m^n \cdot \left(\frac{r_m^{1-n} - \left(r_m^2 - \frac{2 \cdot c \cdot \rho \cdot r_m \cdot v}{\rho_s \cdot \epsilon_s} \right)^{1-n}}{1-n} \right) \quad (20)$$

Adotando a mesma metodologia para a Equação (12), obtém-se a perda de carga para o meio filtrante.

$$P_m - P_{atm} = \frac{M}{k_m^{\frac{n+1}{2}}} \left(\frac{dv}{dt} \right)^n \cdot r_m^n \cdot \left(\frac{r_{ext}^{1-n} - r_m^{1-n}}{1-n} \right)$$

(21)

Somando as Equações (20) e (21), obtém-se a equação para a perda de carga na filtração, Equação (22).

$$\Delta P_f = \frac{M}{k^{\frac{n+1}{2}}} \left(\frac{dv}{dt} \right)^n \cdot r_m^n \cdot \left(\frac{r_m^{1-n} - \left(r_m^2 - \frac{2 \cdot c \cdot r_m \cdot v}{\rho_s \cdot \epsilon_s} \right)^{1-n}}{1-n} \right) + \frac{M}{k_m^{\frac{n+1}{2}}} \left(\frac{dv}{dt} \right)^n \cdot r_m^n \cdot \left(\frac{r_{ext}^{1-n} - r_m^{1-n}}{1-n} \right)$$

(22)

A espessura da torta pode ser obtida pela equação abaixo.

$$e(z, t) = r_m - \left[r_m^2 - \frac{2 \cdot c \cdot r_m \cdot v(z, t)}{\epsilon_s \rho_s} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Definindo,

$$f_T(v) = r_m^n \left(\frac{r_m^{1-n} - \{r(v)\}^{1-n}}{1-n} \right) \quad \text{e} \quad f_M = r_m^n \left(\frac{r_{ext}^{1-n} - r_m^{1-n}}{1-n} \right).$$

Pode-se chegar a expressão que permite avaliar fluxo de filtrado como uma função do tempo

$$\frac{dv(t)}{dt} = \sqrt[n]{\frac{\Delta P_f}{k \cdot \frac{n+1}{2} \cdot f_T(v(t)) + \frac{M}{k_m \cdot \frac{n+1}{2}} \cdot f_M}} \quad (23)$$

O volume de filtrado em cada tempo t pode ser obtido pela integração da Equação (24) a partir dos dados de $v(z, t)$ obtidos pela integração da Equação (23).

$$V(t) = \pi D_t \int_0^L v(z, t) dz$$

(24)

4. Materiais e Métodos

4.1 Aparato experimental

4.1.1 A Unidade Piloto para a filtração cruzada

Para o estudo da filtração cruzada, construiu-se uma unidade piloto como mostra o esquema na figura 4. Na figura 5 pode ser vista uma foto da unidade montada no laboratório. A unidade consistia basicamente de um reservatório de suspensão (capacidade total de 500 litros) ligado a uma bomba de deslocamento positivo (1,5 cv – Weatherford) que alimentava uma linha contendo o filtro e uma corrente de “by-pass”. O tanque era dotado também de um agitador mecânico de forma a manter a suspensão homogênea dentro do reservatório. A descarga do “by-pass” e o volume de filtrado recolhido foram direcionadas para o próprio reservatório mantendo assim um circuito fechado. O controle da pressão de filtração desejada para cada experimento foi feito com o auxílio de um manômetro de Bourdon instalado imediatamente antes do início do filtro. Para fixar uma determinada pressão de filtração, manipulava-se a vazão de suspensão presente na corrente de “by-pass”. A queda de pressão no filtro foi medida com o auxílio de transdutores de pressão (SMAR), como mostra a figura 6, calibrados na faixa de 0-36 mmHg, 0-350 mmHg e 0-1800 mmHg. A tubulação empregada para a construção da unidade era de PVC (Tigre) e com diâmetro de 1 polegada.

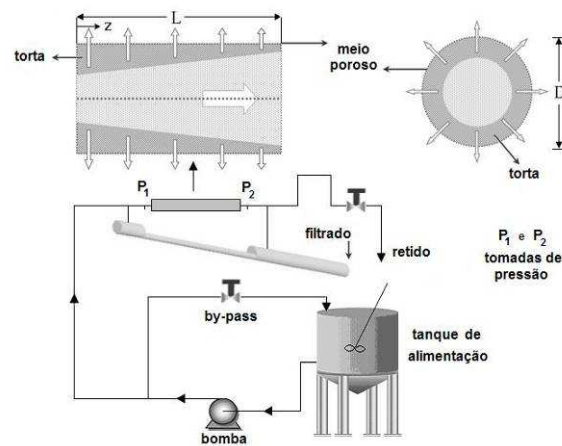


Figura 4: Esquema representativo da unidade piloto.



Figura 5: Foto da unidade experimental equipada para a filtração



Figura 6: Medidores de pressão diferencial (SMAR).

Para a determinação dos parâmetros da filtração cruzada como resistividade da torta e resistência do meio filtrante, objetivo desse trabalho, em cada experimento foi necessário medir as seguintes variáveis: volume de filtrado, tempo de filtração, pressão de filtração, concentração da suspensão, temperatura da suspensão, vazão do retido e porosidade da torta.

4.1.2 Unidade de bancada para a filtração plana

Um esquema da unidade de bancada para a filtração plana pode ser vista na figura 7. A unidade construída consistia de um reservatório de suspensão (Becher), com capacidade de 2 litros, ligado a uma bomba de vácuo através de mangueiras. O sistema também constava de agitador magnético (placa de agitação) para garantir a homogeneização da suspensão. Um septo filtrante (filtro folha) constituído de tecido de filtração (Tecitec) foi utilizado para realizar a filtração. Uma proveta graduada de 0 a 1000 mililitros foi utilizada entre o filtro folha e a bomba de vácuo com o objetivo de quantificar o volume de

filtrado de acordo com o tempo de filtração. Um suporte também foi utilizado para fixar o filtro folha e o vacuômetro.

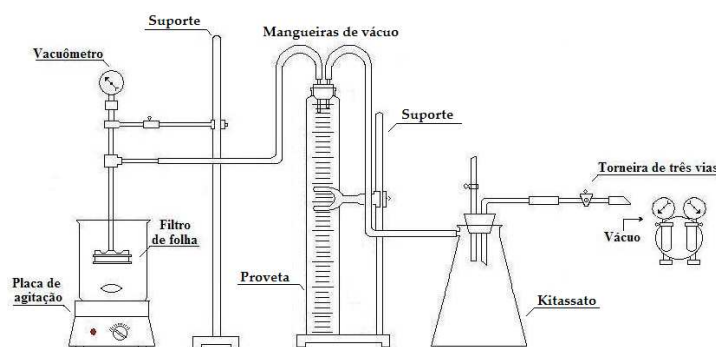


Figura 7: Esquema da unidade de bancada do filtro folha.

Uma foto da unidade montada para a filtração em filtro folha pode ser mostrada na figura 8.



Figura 8: Foto da unidade de bancada do filtro folha.

Todos os resultados apresentados ao longo desse trabalho foram obtidos com a unidade descrita acima. Foram feitos também ensaios em filtro folha com o objetivo de determinar parâmetro experimental α , resistividade da torta, e R_m , resistência do meio filtrante.

Para cada experimento foi necessário medir as seguintes variáveis: volume de filtrado, tempo de filtração, pressão de filtração, concentração da suspensão, temperatura da suspensão e porosidade da torta.

4.1.3 Medidas de concentração e vazão

As concentrações de sólidos nas correntes foram medidas pela técnica gravimétrica. Durante cada experimento, recolhiam-se três amostras de cada uma das três correntes, em recipientes previamente pesados. Estas amostras eram pesadas e depois levadas a uma estufa para secar. As amostras secas e frias eram pesadas novamente. Desta forma, conhecendo-se a quantidade de água e de sólidos residuais calculava-se a concentração, em peso, de cada corrente.

A vazão mássica da corrente de retido para a filtração cruzada foi obtida através da coleta de suspensão durante um determinado tempo. Repetia-se este procedimento três vezes com o intuito de obter um valor médio.

4.1.4 Material particulado.

A distribuição granulométrica do carbonato de cálcio utilizado para preparar a suspensão foi determinada pelo analisador de partículas MALVERN – MASTERSIZE 2000. A distribuição do tamanho de partículas pode ser avaliada pela figura 9.

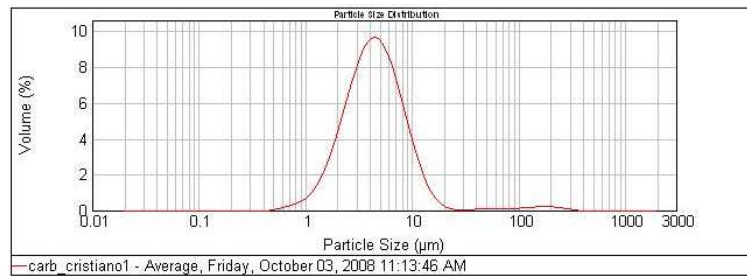


Figura 9: Distribuição do tamanho das partículas para o carbonato de cálcio.

O valor da densidade do carbonato de cálcio foi de 2,7 g/cm³ (PERRY, 1953).

4.1.5 Determinação da porosidade

Através do recolhimento de uma fração da torta, após o experimento para ambos os processos de filtração, determinou-se a porosidade da mesma pela seguinte relação:

$$\varepsilon = \frac{\text{volume de vazios}}{\text{volume total}}$$

onde, o volume de vazios é representado pelo volume de água presente na estrutura da torta recolhida.

4.1.6 Os meios filtrantes

Foram adquiridos diferentes meios porosos fabricados com diferentes matérias primas e dimensões. Partiu-se do princípio que o meio poroso deveria ter forma geométrica cilíndrica, para que a filtração ocorresse na direção radial, simulando assim a mesma condição existente na filtração durante o processo de perfuração de poços. O primeiro material adquirido foi constituído de aço inox sinterizado como mostra a figura 10a. O princípio da sinterização consiste na fundição de granulometria de materiais metálicos formando assim uma peça sólida, porém porosa pela existência de vazios entre os grãos. A peça utilizada tinha diâmetro interno de $\frac{3}{4}$ de polegadas e 20 centímetros de comprimento, com porosidade de 1 Darcy e 0,4 centímetros de espessura de parede. O segundo material adquirido era constituído de fibras prensadas de polipropileno fabricadas especificamente para tratamento de água, conforme mostrado na figura 10b, com porosidade variável entre 1 e 50 micrômetros, comprimento de 50 centímetros, espessura da parede entre 1 cm e diâmetro interno de 1 polegada. Por terceiro e último, utilizou-se tecidos de filtração fabricados pela TECITEC mostrado na figura 10c, feitos em polietileno e costurados em forma cilíndrica com diâmetro interno de 1 polegada, com espessura de parede de aproximadamente 0,1 centímetros e comprimento de 1 metro.

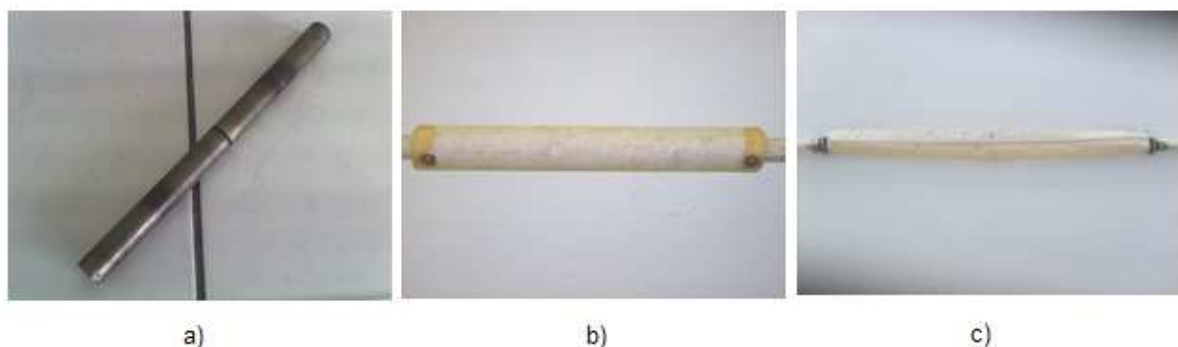


Figura 12: a) Meio poroso sinterizado de aço inox, b) Meio poroso em polipropileno e detalhe da tomada de pressão e c) Meio poroso composto por tecido de filtração.

Dentre os meios filtrantes acima testados, o que foi utilizado para gerar os resultados parciais, presentes nesse trabalho, foi o tecido de filtração da empresa TECITEC, pois, o mesmo, apresentou menor tempo para a estabilização de ΔP e vazão de filtrado em experimento com água pura.

4.2 Metodologia

Os experimentos foram realizados em dois modelos de filtro com uma concentração fixa e diferentes pressões. Os primeiros experimentos foram conduzidos na unidade construída para a filtração cruzada e, posteriormente, no filtro folha de laboratório (filtração à vácuo). O experimento iniciava com o estabelecimento da concentração de sólidos na alimentação pela adição do material sólido a uma massa de água conhecida.

Para o processo da filtração cruzada, a sistemática de realização do experimento consistia simplesmente em regular a vazão de “by-pass” através da válvula de modo a obter uma determinada leitura de pressão na alimentação. Com o equipamento em circuito fechado, aguardava-se alguns instantes para que o processo entrasse em regime. Fez-se a suspensão circular na linha produzindo um volume de filtrado e de retido. O volume de filtrado foi quantificado com o tempo de filtração. A pressão de filtração foi medida pelo manômetro e as alíquotas de suspensão foram recolhidas durante a filtração para a determinação da concentração. A vazão de retido foi medida ao final do experimento por técnica gravimétrica com triplicata para cada ponto. A temperatura também foi medida para cada experimento. Uma fração da torta formada foi retirada ao final do experimento para a determinação da porosidade. O tecido de filtração foi lavado após cada experimento e utilizado novamente no experimento posterior em ambos os processos de filtração.

Realizaram-se experimentos na filtração cruzada com o objetivo de determinar a resistividade da torta α , e a resistência do meio filtrante R_m . Os experimentos foram realizados com uma concentração de 2 a 4 % p/p de carbonato de cálcio e as pressões de filtração variáveis de acordo com os experimentos na faixa de 1,0 a 2,0 kgf/cm².

O volume de filtrado com o tempo foi trabalhado em uma planilha do excel, e plotados em um gráfico t/v (tempo por volume de filtrado por área de filtração) versus v (volume de filtrado por área de filtração). O objetivo do gráfico t/v versus v é a obtenção do coeficiente angular e linear, para a determinação de α e R_m , respectivamente. Para o processo da filtração cruzada é necessário desprezar os pontos iniciais do experimento, permanecendo apenas a reta final descrita pelo gráfico de t/v versus v , onde realmente está ocorrendo o processo de filtração. A equação 6 foi utilizada para o cálculo de α e R_m .

Com relação aos experimentos no filtro folha, a suspensão foi homogeneizada com o auxílio de agitador magnético (placa de agitação) e o septo filtrante, filtro folha, foi introduzido no reservatório. Uma proveta graduada de 0 a 1000 mililitros foi colocada entre o filtro folha e a bomba de vácuo com o objetivo de quantificar o volume de filtrado com o tempo de filtração. A bomba à vácuo foi acionada e o processo de filtração iniciou-se. O volume de filtrado foi quantificado através da proveta, o tempo de filtração foi anotado e a pressão de filtração foi fornecida pelo vacuômetro. A temperatura foi medida para cada experimento. Uma fração da torta formada também foi retirada ao final do experimento para a determinação da porosidade. Com a equação 1, descrita para a filtração plana (filtro folha), é possível também obter os valores de $\langle\alpha\rangle$ e R_m com base nos dados experimentais.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Filtração cruzada

A partir dos dados de vazão de filtrado com o tempo de filtração determinou-se, através da equação 6 com $n=1$, o valor de α e R_m , para cada um dos experimentos, utilizando-se o trecho linear do gráfico. Os resultados obtidos para os parâmetros foram então alimentados na equação 2 que foi integrada numericamente utilizando o *software* MATLAB. A equação 2 também foi resolvida utilizando-se um valor médio para a resistividade da torta, obtido a partir dos sete experimentos realizados. As figuras 11 e 12 mostram uma comparação entre os resultados obtidos para as duas simulações realizadas e os dados experimentais obtidos em 2 ensaios. Como se pode observar, o modelo apresenta a mesma tendência dos dados experimentais, o que também ocorre para os demais experimentos, embora em alguns casos com desvios maiores que os apresentados nas figuras. Serão realizados mais experimentos para validar a metodologia utilizada.

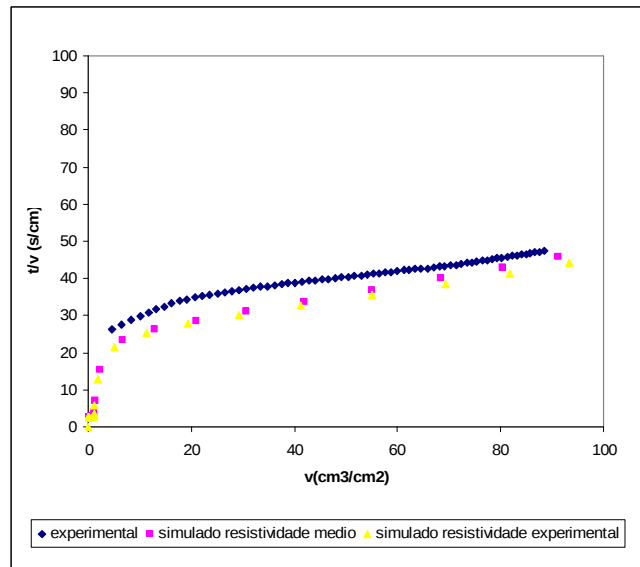


Figura 11: Experimento de filtração cruzada realizado com concentração de 4,3% em p/v, com $\Delta P = 1,5$ kgf/cm².

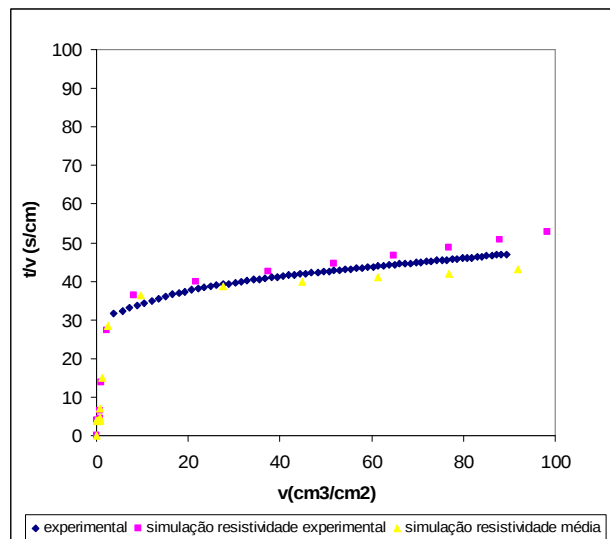


Figura 12: Experimento de filtração cruzada realizado com concentração de 5,9% em p/v, com $\Delta P = 1,0$ kgf/cm².

5.2) Filtro folha

Com o objetivo de se verificar a possibilidade de se obter os parâmetros em filtração convencional. Foram realizados ensaios de filtração em filtro folha, os resultados obtidos para estes testes são apresentados na figura 13.

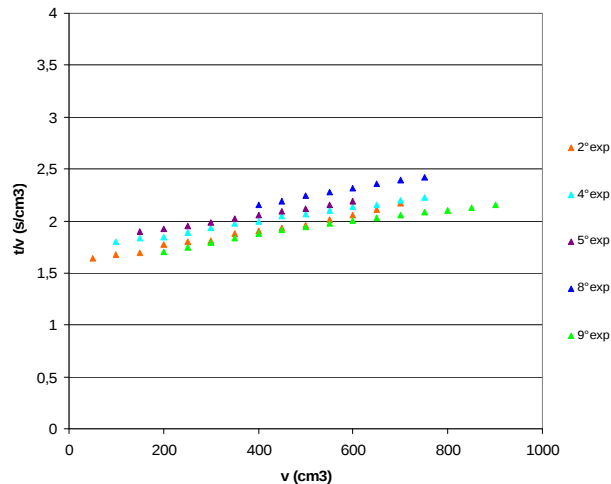


Figura 13: Gráfico representando os pontos experimentais para os ensaios na filtração plana.

Os experimentos relativos à filtração plana, como mostrado na figura 13, foram realizados com pressão em torno de 0,65 kgf/cm² e concentração em torno de 4%. Os valores dos parâmetros α e R_m , e também a média dos mesmos, são apresentados na tabela 2 para estes experimentos.

Tabela 1: Valores de α e R_m para os experimentos na filtração plana.

Experimento	α (cm/g)	R_m (cm ⁻¹)
2	$7,61 \times 10^9$	$6,04 \times 10^9$
4	$6,04 \times 10^9$	$5,65 \times 10^9$
5	$5,97 \times 10^9$	$6,44 \times 10^9$
8	$4,74 \times 10^9$	$4,46 \times 10^9$
9	$4,15 \times 10^9$	$5,16 \times 10^9$
Média	$(5,70 \pm 1,34) \times 10^9$	$(5,55 \pm 0,83) \times 10^9$

Pode-se perceber pela tabela que os desvio experimentais são da ordem tanto para resistividade quanto para a resistência do meio filtrante.

A título de comparação foram realizados ensaio de filtração cruzada com condições semelhante a do filtro folha obtendo-se como resultado médio $\alpha = 1,22 \times 10^9$ cm/g e $R_m = 3,32 \times 10^9$ cm⁻¹.

Os resultados para a resistividade da torta e resistência do meio filtrante provenientes da filtração cruzada e plana são divergentes, indicando que a resistividade da torta varia com o tipo de filtração empregado. Tais observações experimentais, informam que não é possível utilizar os dados provenientes da filtração plana para a implementação de um modelo matemático, que possa prever o comportamento da filtração cruzada.

5. CONCLUSÃO

Foram construídas unidades de filtração cruzada e plana para o desenvolvimento dos experimentos. Um modelo matemático para o cálculo do volume de filtrado com o tempo de filtração, quando o fluido tem comportamento não-Newtoniano, foi apresentado. Os valores de resistividade da torta e da resistência do meio filtrante foram determinados com a aplicação dos dados experimentais nas equações para a filtração. Foi observado que os resultados da integração da equação 2 fornecem a tendência dos dados de filtração cruzada obtidos experimentalmente. Verificou-se que os parâmetros obtidos nos ensaios de filtro folha são diferentes dos obtidos na filtração cruzada indicando que o processo de filtração influencia a resistência da torta formada.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradece a Petrobras, CNPq e FINEP o apoio financeiro recebido.

7. REFERÊNCIAS

- FERREIRA, A.S; MASSARANI, G.; Physico-mathematical modeling of crossflow filtration, Chemical Engineering Journal, 111, 199-204, 2005.
- MASSARANI, G.; “Filtração”, Revista Brasileira de Engenharia, Set. 1985.
- MACCABE, W.L., SMITH, J.C.; “Unit Operations of Chemical Engineering”, McGraw-Hill, Inc., Nova Iorque, 3a edição, p. 938, 1976.
- MASSARANI, G.; “Fluidodinâmica em Sistemas Particulados”, 2a edição, Rio de Janeiro, E-Papers Serviços Editoriais, 2002.
- MASSARANI, G., SILVA TELLES, A., DAMASCENO, J.J.R., “Evaluation of the Compression-Permeability Behavior of Sediments Subject to Small Deformations”, Anais do 6th World Filtration Congress, Nagoya, Japão, maio, 91-95, 1993.
- PERRY, J.H.; “Chemical engineer’s handbook”, R 660.2, P 463, 1953.
- SHIRATO, M., KOBAYASHI, K., TANIMURA, M., “Analysis of Constant Pressure Filtration of Compressible Cakes on Cylindrical Surface”, Kagaku, 37, 1, 76.
- SILVA TELLES, A., MASSARANI, G.; “Compactação de meios deformáveis: Uma descrição segundo a mecânica do contínuo”, Anais do X ABCM, Rio de Janeiro, dezembro, vol.2, 13-16, 1989.

FILTRAÇÃO CRUZADA DE SUSPENSÕES DE CARBONATO DE CÁLCIO

C.A.O. ARAÚJO¹, A.L. MARTINS², L.A.CALÇADA¹, C.M. SCHEID¹

¹Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Química, Instituto de Tecnologia, BR-465, Km 7, Seropédica-RJ

E-mail: scheid@ufrj.br

²Cenpes/Petrobrás, Centro de Pesquisas Leopoldo Miguez de Mello, CEP: 21949-900
Rio de Janeiro-RJ

E-mail: aleibsohn@petrobras.com.br

RESUMO - Na perfuração e completação de poços de petróleo, o fluido de perfuração ao escoar pela região anular invade a formação levando ao crescimento de uma torta na parede do poço, podendo comprometer a avaliação do reservatório, durante a testemunhagem, e causar danos irreversíveis ao mesmo. O processo que governa a invasão do fluido de perfuração na formação rochosa é o mesmo que prevalece na filtração estática, quando o fluido para de circular, e dinâmica, quando o fluido escoar através do poço. O controle da filtração no processo de perfuração de poços de petróleo tem sido alvo de estudo em função do seu impacto nos custos das operações de produção de poços. Neste trabalho, serão apresentados resultados experimentais obtidos em diferentes condições de filtração buscando comparar e conhecer os mecanismos que controlam a filtração, tanto, em condições estáticas, quanto dinâmicas. Três unidades de filtração foram construídas, uma dinâmica (filtração cruzada) e duas outras de filtração estática (filtro folha e filtração sob pressão) para avaliação dos parâmetros da filtração como resistividade média da torta, resistência do meio filtrante, tempo de filtração e volume de filtrado. Todos estes parâmetros também foram determinados em filtro HTHP (Fann Instruments), equipamento utilizado na indústria de petróleo para o estudo da filtração estática.

INTRODUÇÃO

A filtração está presente no processo de perfuração de poços de petróleo (PEDEN et al., 1984; OUTMANS, 1963; JIAO & SHARMA, 1992; ERSHAGHI & AZARI, 1980). Nestes sistemas, o fluido de perfuração é injetado pelo interior da coluna de perfuração e retorna a superfície pelo espaço anular existente entre a coluna de perfuração e a formação rochosa. Sendo a formação rochosa um meio poroso, há uma tendência deste fluido permear para o interior dessa formação. Esta invasão de fluido de perfuração na formação rochosa é uma ação indesejada, podendo comprometer a amostragem e, conseqüentemente, a avaliação do óleo. (BOURGOYNE et al., 1991).

Dois modos de filtração estão presentes no processo de perfuração. Enquanto as brocas estão perfurando o modo de filtração presente é a dinâmica (ou cruzada). Quando há a necessidade de uma parada no bombeio de fluido, o modo de filtração que prevalece é a estática (ou plana). O entendimento dos processos de filtração do fluido de perfuração e sua influência nos mecanismos de formação do reboco e dano à formação tem atraído interesse contínuo na engenharia de petróleo (ERSHAGHI & AZARI, 1980). O controle da filtração tem um considerável impacto nos custos das operações de perfuração e na produtividade do poço (WALDMANN et al., 2006).

A filtração cruzada difere da plana pela presença de um escoamento tangencial ao fluxo de permeado. A figura 1 ilustra a invasão de fluido de perfuração à formação rochosa e a figura 2 mostra o processo de formação de torta na filtração cruzada.

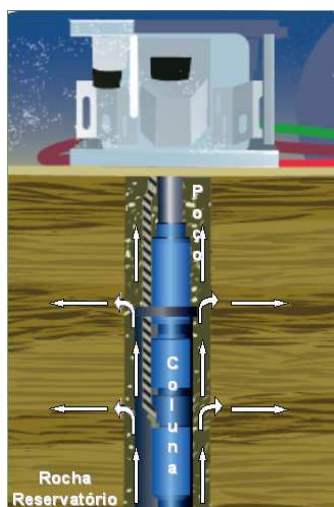


Figura 1: O processo da filtração cruzada e a região anular.

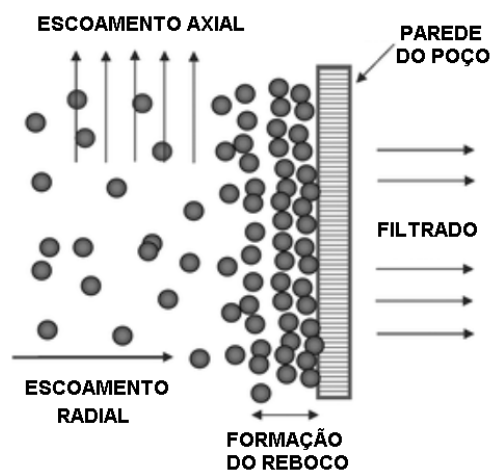


Figura 2: A formação de torta no processo da filtração cruzada.

Neste trabalho, serão apresentados resultados experimentais para resistividade da torta, resistência do meio filtrante e porosidade da torta, obtidos em diferentes modos de filtração buscando comparar e conhecer os mecanismos que controlam a filtração, tanto em condições estáticas, quanto dinâmica.

O equacionamento para a filtração cruzada (1) a ser utilizada nesse trabalho foi proposta por FERREIRA & MASSARANI (2005). A equação da filtração plana (2) pode ser avaliada em McCABE et al (1993).

- Filtração cruzada, coordenadas cilíndricas e fluido newtoniano:

$$t = \frac{\mu_F}{(\Delta p)_f} \left\{ \alpha \varepsilon_s \rho_s r_t \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b^n}{2n(n+1)r_t^{2n}} v^n + R_m \right\} v$$

(1)

Onde:

$$b = \frac{2c\rho_F r_t}{\varepsilon_s \rho_s}$$

- Filtração plana, coordenadas retangulares e fluido newtoniano:

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu}{A(\Delta p)} \left[\frac{<\alpha> C \rho_1 V}{2A} + R_m \right]$$

(2)

onde:

A – área de filtração;

c – concentração da suspensão;

n – número de pontos da série;

Rm – resistência do meio filtrante;

r_t – raio do tubo;

t – tempo de filtração;

v – volume de filtrado por área de filtração;

V – volume de filtrado;

α – resistividade da torta;

ε_s – fração volumétrica do sólido;

μ_F – viscosidade do fluido;

ΔP_f – diferencial de pressão;

ρ_s – densidade do sólido;

MATERIAIS E MÉTODOS

Unidades experimentais

Três unidades experimentais foram construídas para obter os resultados experimentais. Uma para filtração cruzada e duas para filtração plana. Em todas as unidades construídas e também para a filtração HTHP, o meio filtrante utilizado foi o tecido de filtração da empresa Tecitec, sendo o mesmo utilizado apenas uma vez.

Os estudos foram conduzidos com suspensões de carbonato de cálcio com granulometria na faixa de 1 a 10 μm, figura 3, em diferentes concentrações e pressão de filtração.

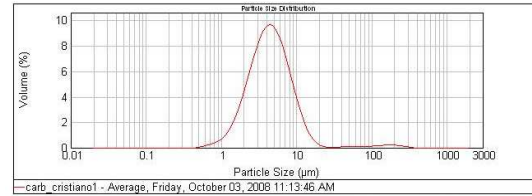


Figura 3: Distribuição do tamanho das partículas para o carbonato de cálcio.

Para a filtração cruzada a unidade experimental opera em circuito fechado e é composta por tubos de PVC como mostra o esquema e a foto das figuras 4 e 5, respectivamente. O sistema é composto por uma linha com tubos de 2,54 cm de diâmetro onde foi instalado o meio filtrante, e o volume de filtrado foi recolhido através de uma calha que conduzia o mesmo para uma balança eletrônica. O volume de filtrado foi encontrado dividindo as massas de fluido, obtido com auxílio da balança, pela densidade do mesmo (ρ_{água}=1 g/cm³). O filtro construído a partir do tecido de filtração possui um diâmetro de 2,54 cm, espessura de 0,1 cm e comprimento de 100 cm.

A suspensão que não permeia o filtro, chamado de retido, segue até o final da linha para retornar ao tanque. Uma outra linha com tubulação de 5,08 cm constitui-se em um by-pass com o objetivo de controlar a vazão de filtrado. O sistema encontra-se conectado a um tanque de 500 litros. O deslocamento da suspensão de carbonato de cálcio na unidade foi feito através de uma bomba de deslocamento positivo de 1,5 cv (GEREMIA PUMPS). As medidas de perda de carga foram feitas com um transdutor de pressão (SMAR) calibrado de 0 a 35 mmHg. A partir desta unidade foram obtidos os dados relativos à filtração dinâmica.

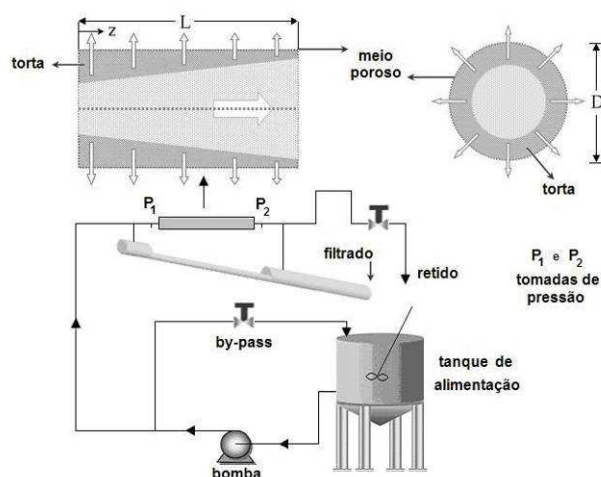


Figura 4: Esquema da unidade experimental de filtração cruzada.



Figura 7: Foto da unidade experimental de filtração plana, filtro folha.



Figura 5: Foto da unidade experimental de filtração cruzada.

As figuras 6 e 7 mostram, respectivamente, o esquema e uma vista real do aparato utilizado para a filtração plana via filtro folha.

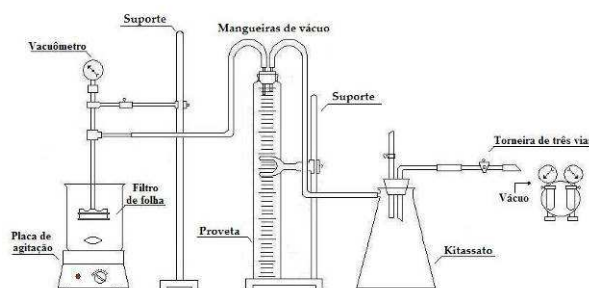


Figura 6: Esquema da unidade experimental de filtração plana, filtro folha.

A unidade do filtro folha foi composta por um reservatório de suspensão (Becher), com capacidade de 2 litros, ligado a uma bomba de vácuo através de mangueiras. O sistema possuía um agitador magnético (placa de agitação) para garantir a homogeneização da suspensão. Um septo filtrante (filtro folha) constituído de tecido de filtração (Tecitec) foi utilizado para realizar a filtração. Uma proveta graduada de 0 a 1000 mililitros foi utilizada entre o filtro folha e a bomba de vácuo com o objetivo de quantificar o volume de filtrado de acordo com o tempo de filtração.

Utilizou-se também uma unidade experimental para a filtração plana sob pressão, que foi construída através de uma adaptação a partir da unidade experimental da filtração cruzada. Onde anteriormente existia o meio filtrante para a filtração cruzada, foi adaptada uma linha contendo uma válvula de restrição, um manômetro de Bourdon e uma célula de filtração onde foi fixado o meio filtrante (tecido de filtração). Foi utilizada uma balança eletrônica (Filizola, 15kg) para aferir a massa de filtrado de acordo com o tempo de filtração. As figuras 8 e 9 mostram, respectivamente, um esquema e uma foto real da unidade experimental adaptada.

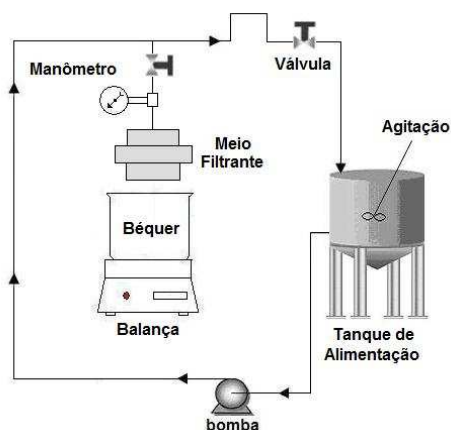


Figura 8: Unidade experimental para a filtração plana sob pressão.



Figura 9: Foto da unidade experimental para a filtração plana sob pressão.

Foi utilizado ainda um equipamento de filtração estática Filter Press HTHP 175 ml (Fann Instruments) para obter volume de filtrado e tempo de filtração, com o objetivo de comparar os parâmetros obtidos com aqueles determinados pelo filtro folha, filtração cruzada e filtração sob pressão. O gás nitrogênio foi utilizado na linha pressurizada. O equipamento utiliza anéis de vedação, para fixar o tecido de filtração e evitar vazamentos próximo a parede da célula, tampa superior fixada com parafusos, compartimento com capacidade de 175 ml para armazenar a suspensão e aberturas na parte superior e inferior do compartimento, para permitir a entrada de pressão e saída de filtrado, respectivamente. A figura 10 mostra o aparato experimental utilizado

para os experimentos relativos à filtração HTHP.



Figura 10: Aparato experimental utilizado para a filtração plana, filtro HTHP.

Procedimento experimental

Os experimentos foram realizados com as concentrações de 2%, 4% e 6% e pressões de 1kgf/cm², 1,5 kgf/cm² e 2 kgf/cm². Os experimentos no filtro folha foram limitados devido às condições de vácuo.

Para o processo da **filtração cruzada**, a sistemática de realização do experimento consistia simplesmente em regular a vazão de “by-pass” através da válvula de modo a obter uma determinada leitura de pressão na alimentação. Com o equipamento em circuito fechado, aguardavam-se alguns instantes para que o processo entrasse em regime. A suspensão de carbonato de cálcio ($\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$) utilizada nos experimentos foi preparada adicionando o carbonato em uma determinada quantidade de água previamente calculada. Fazia-se a suspensão circular na linha produzindo um volume de filtrado (volume advindo do escoamento radial) e de retido (volume advindo do escoamento axial). O volume de filtrado foi quantificado com o tempo de filtração. A pressão de filtração foi medida por um manômetro instalado imediatamente antes do início do meio

filtrante, e as alíquotas de suspensão foram recolhidas durante a filtração para a determinação da concentração. A vazão de retido foi medida por técnica gravimétrica com triplicata para cada ponto. A temperatura também foi aferida para cada experimento. Uma fração da torta formada foi retirada ao final de cada experimento para a determinação da porosidade.

O volume de filtrado com o tempo foi trabalhado em uma planilha do Excel, e plotados em um gráfico t/v versus v , para a filtração cruzada. A variável v representa o volume de filtrado por unidade de área de filtração. O objetivo do gráfico t/v versus v (ou t/V versus V , como será visto mais adiante) é a determinação dos parâmetros α e R_m . Em alguns casos, foi necessário desprezar os pontos iniciais dos experimentos, permanecendo apenas a reta final descrita pelo gráfico de tempo de filtração versus volume de filtrado.

Com relação aos experimentos no **filtro folha**, a suspensão foi homogeneizada com o auxílio de agitador magnético (placa de agitação) e o septo filtrante, filtro folha, foi introduzido no reservatório. A bomba a vácuo foi acionada e o processo de filtração iniciou-se. O volume de filtrado foi quantificado através da proveta, o tempo de filtração foi anotado e a pressão de filtração foi fornecida pelo vacuômetro. A temperatura foi medida para cada experimento. Uma fração da torta formada também foi retirada ao final do experimento para a determinação da porosidade. Para todos os experimentos da filtração plana a equação 2 foi utilizada para a determinação de $\langle \alpha \rangle$ e R_m . As coordenadas dos gráficos de volume de filtrado versus tempo de filtração para a filtração plana são descritas como t/V e V , onde V é simplesmente o volume de filtrado obtido experimentalmente.

Para a **filtração plana HPHT**, os volumes de filtrado de acordo com o tempo de filtração foram obtidos com o auxílio do equipamento Filter Press HPHT 175 ml (fann Instruments). A suspensão foi preparada analogamente ao processo já descrito na filtração cruzada. O aparato era conectado a uma linha pressurizada sendo possível controlar a pressão para cada um dos experimentos. Foi utilizado também nos experimentos com o filtro HTHP o tecido de filtração como meio poroso, descartando assim, o meio filtrante de cerâmica que geralmente é utilizado no mesmo.

Para a **filtração sob pressão**, o procedimento experimental foi idêntico ao da filtração cruzada no que se refere ao preparo da suspensão, estabelecimento da pressão de filtração, pesagem do filtrado e avaliação da torta final de filtração.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uma malha experimental foi adotada para a realização dos experimentos e pode ser vista na figura 11. Todas as combinações experimentais descritas na malha foram reproduzidas para a filtração cruzada, sob pressão e HTHP. Para o filtro folha, não foi possível realizar todos os experimentos devido às condições de operação à vácuo.

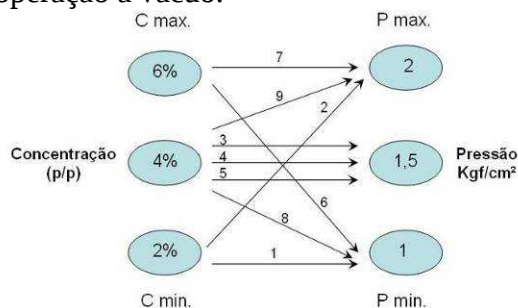


Figura 11: Esquema da malha experimental com os números dos respectivos experimentos realizados.

Os resultados experimentais de tempo de filtração e volume de filtrado

foram obtidos a partir das unidades de filtração construídas e do equipamento de filtração HTHP. Os resultados de volume de filtrado com o tempo de filtração para todos os experimentos relativos à filtração plana e cruzada foram plotados nas figuras 12, 13, 14 e 15. Deve-se ressaltar que os valores das abscissas e ordenadas são distintos para cada filtração devido aos mesmos possuírem diferentes áreas de filtração.

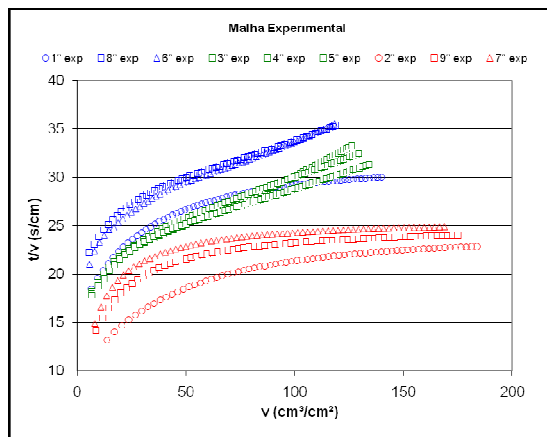


Figura 12: Gráfico dos resultados experimentais para a filtração cruzada.

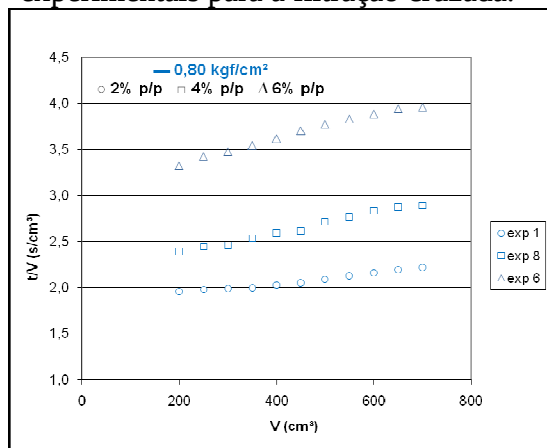


Figura 13: Gráfico dos resultados experimentais para a filtração em filtro folha.

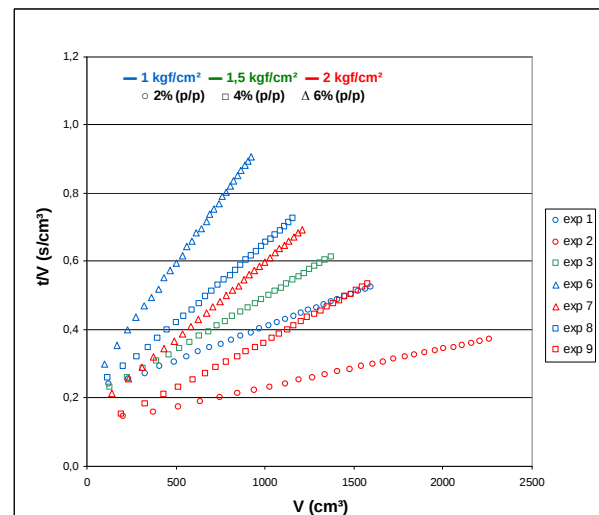


Figura 14: Gráfico dos resultados experimentais para a filtração sob pressão.

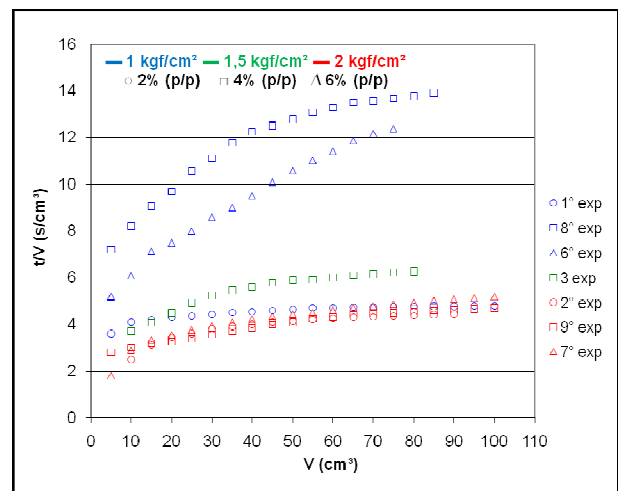


Figura 15: Gráfico dos resultados experimentais para a filtração HTHP.

Para cada modo de filtração foram determinados os valores da resistividade da torta, α , e resistência do meio filtrante, R_m , com o objetivo de compará-los. Tais valores aparecem nas tabelas 1 e 2, respectivamente, e são obtidos a partir dos valores dos coeficientes angulares e lineares das retas finais, formadas por pontos experimentais em cada experimento mostrado.

Tabela 1: Valores de α para os dois modos de filtração usando o filtro HTHP e as unidades construídas.

Exp.	c (p/p)	P (kgf/cm ²)	α_{CRUZADA} (cm/g)	α_{HTHP} (cm/g)	$\alpha_{\text{PRESSÃO}}$ (cm/g)	α_{FOLHA} (cm/g)
1	0,02	1,0	$2,30 \times 10^8$	$1,75 \times 10^{10}$	$4,14 \times 10^9$	$3,23 \times 10^9$
2	0,02	2,0	$3,46 \times 10^8$	$9,21 \times 10^{10}$	$4,17 \times 10^9$	-
3	0,04	1,5	$6,29 \times 10^8$	$7,20 \times 10^{10}$	$4,79 \times 10^9$	-
6	0,06	1,0	$2,58 \times 10^8$	$2,03 \times 10^{11}$	$5,09 \times 10^9$	$2,57 \times 10^9$
7	0,06	2,0	$6,60 \times 10^7$	$1,21 \times 10^{11}$	$5,55 \times 10^9$	-
8	0,04	1,0	$3,75 \times 10^8$	$7,71 \times 10^{10}$	$5,27 \times 10^9$	$3,83 \times 10^9$
9	0,04	2,0	$1,36 \times 10^8$	$1,85 \times 10^{11}$	$6,27 \times 10^9$	-

Como pode ser visto os valores de α encontrados na filtração cruzada, em comparação com a filtração plana, diferem nos seus valores inclusive na ordem de grandeza. Em todos os casos a resistividade da torta é na filtração plana é superior que na cruzada, como já relatado na literatura (CHARLES et al., 1967). Para a filtração no HTHP os resultados apresentam duas ordens de grandeza superior. Neste equipamento, o modo de filtração é muito distinto, uma vez que são colocados 175 ml de suspensão na célula de filtração e se pressuriza o sistema para a geração do filtrado. Fica evidente pelos resultados que o modo de filtração interfere no critério de formação da torta conduzindo a diferentes valores de α . Os experimentos realizados para a filtração sob pressão e filtro folha são os que apresentam alguma semelhança em seus valores de resistividade. Neste caso, deve ser levado em consideração que os experimentos do filtro folha foram realizados à vácuo, 0,80 kgf/cm², o que difere da filtração sob pressão que foi realizada a 1 kgf/cm².

Os resultados para resistência do meio filtrante apresentam resultados semelhantes para filtração cruzada, sob pressão e à vácuo. Para o HTHP os resultados são uma ordem de grandeza superiores, o que pode indicar que neste equipamento, o fato de a suspensão ficar em repouso durante a pressurização pode gerar uma migração de finos para o tecido ocasionado uma redução da permeabilidade do mesmo e um aumento da resistência do meio

filtrante. Para a avaliação completa deste equipamento outros experimentos terão de ser realizados.

Tabela 2: Valores de Rm para os dois modos de filtração usando o filtro HTHP e as unidades construídas.

Exp.	c (p/p)	P (kgf/cm ²)	Rm _{CRUZADA} (1/cm)	Rm _{HTHP} (1/cm)	Rm _{PRESSÃO} (1/cm)	Rm _{FOLHA} (1/cm)
1	0,02	1,0	$2,62 \times 10^9$	$1,07 \times 10^{10}$	$9,42 \times 10^8$	$3,67 \times 10^9$
2	0,02	2,0	$3,86 \times 10^9$	$2,07 \times 10^{10}$	$9,74 \times 10^8$	-
3	0,04	1,5	$2,89 \times 10^9$	$1,71 \times 10^{10}$	$1,25 \times 10^9$	-
6	0,06	1,0	$2,48 \times 10^9$	$1,19 \times 10^9$	$1,31 \times 10^9$	$6,07 \times 10^9$
7	0,06	2,0	$4,56 \times 10^9$	$1,40 \times 10^{10}$	$1,41 \times 10^9$	-
8	0,04	1,0	$2,54 \times 10^9$	$2,89 \times 10^{10}$	$1,11 \times 10^9$	$3,22 \times 10^9$
9	0,04	2,0	$4,24 \times 10^9$	$1,16 \times 10^{10}$	$1,12 \times 10^9$	-

As figuras 16 e 17 mostram exemplos de tortas formadas na filtração cruzada e plana, respectivamente. Amostras destas tortas foram utilizadas para a determinação da porosidade das mesmas. Os valores podem ser encontrados para todos os experimentos na tabela 3. Verifica-se por essa tabela que os resultados de porosidade pouco variaram no conjunto de experimentos realizados apresentando valor médio de $(0,56 \pm 0,01)$. Não foi possível avaliar a porosidade da torta no HTHP devido a dificuldades experimentais.

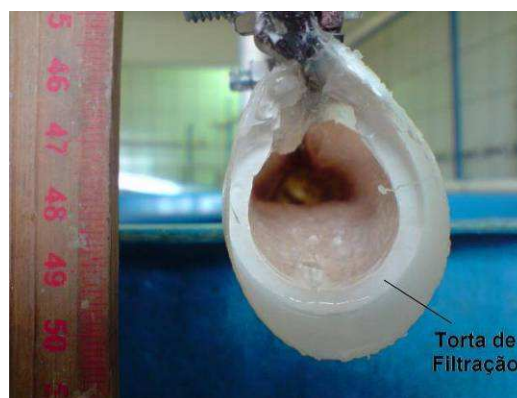


Figura 16: Imagem da torta formada na filtração cruzada.

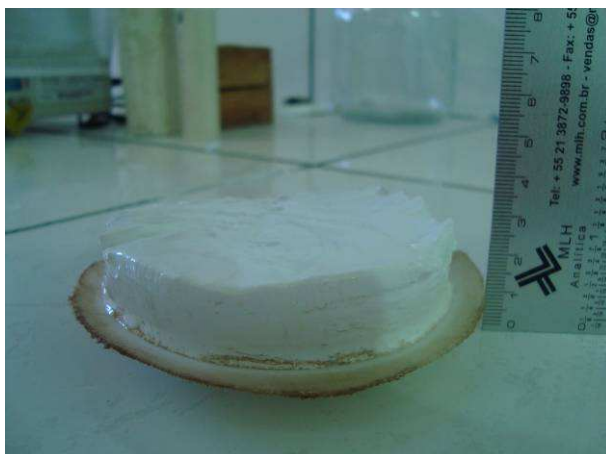


Figura 17: Imagem da torta formada na filtração sob pressão, filtro folha e HTHP.

Tabela 3: Valores de porosidades para a filtração cruzada, filtro sob pressão e folha.

Exp.	c (p/p)	P (kgf/cm ²)	$\epsilon_{\text{CRUZADA}}$	$\epsilon_{\text{PRESSÃO}}$	ϵ_{FOLHA}
1	0,02	1,0	0,56	0,56	0,57
2	0,02	2,0	0,54	0,56	-
3	0,04	1,5	0,55	0,57	-
6	0,06	1,0	0,55	0,58	0,55
7	0,06	2,0	0,54	0,57	-
8	0,04	1,0	0,57	0,58	0,55
9	0,04	2,0	0,54	0,56	-

CONCLUSÃO

Pelos resultados obtidos e para as condições operacionais trabalhadas pode-se concluir que as curvas de filtração obtidas apresentam comportamento esperado, ou seja, o aumento da pressão para uma mesma concentração ocasiona um aumento no volume de filtrado e o aumento da concentração, para uma mesma pressão, gera uma redução no volume obtido do mesmo. Com relação aos valores de resistividade da torta, eles variam de acordo com o tipo de filtração realizado, inclusive na ordem de grandeza. Mais experimentos deverão ser realizados para tentar explicar o fenômeno ocorrido em cada caso. Para os valores de R_m , eles apresentam grande distinção quando obtidos no filtro HTHP, o que pode estar relacionado a

própria estrutura da célula de filtração que permite que a suspensão fique sem agitação durante o ensaio ocasionando a sedimentação por gravidade.

NOMENCLATURA

A – área de filtração;
 c – concentração da suspensão;
 n – número de pontos da série;
 R_m – resistência do meio filtrante;
 r_t – raio do tubo;
 t – tempo de filtração;
 v – volume de filtrado por área de filtração;
 V – volume de filtrado;
 α – resistividade;
 ϵ_s – fração volumétrica do sólido;
 μ_F – viscosidade do fluido;
 ΔP_f – diferencial de pressão;
 ρ_s – densidade do sólido;

REFERÊNCIAS

- BOURGOYNE, A.T., MILLHEIM, K.K., CHENEVERT, M.E., YOUNG JR, F.S.. 1991, Applied drilling engineering, Society of Petroleum Engineers, Richardson, TX, USA, Second Print.
- ERSHAGHI, I., AZARI, M., “Modeling of Filter Cake Buildup Under Dynamic-Static Conditions”, Society of Petroleum Engineers of AIME, SPE 8902, Los Angeles, CA, April 9-11, 1980.
- FERREIRA, A.S; MASSARANI, G.; Physico-mathematical modeling of crossflow filtration, Chemical Engineering Journal, 111, 199-204, 2005.
- JIAO, D., SHARMA, M.M., 1992, “Formation Damage Due to static and Dynamic filtration of Water-Based Muds”, SPE International symposium on Formation Damage Control, SPE 23823, Lafayette, 20-21 fevereiro.
- LAWHON, C.P, EVANS, W.M., SIMPSON, J.P.; “Laboratory

- Drilling rate and Filtration Studies of Emulsion Drilling fluids”, Journal of Petroleum Technology, Reprinted from July 1967, received from SPE 1695.
- MASSARANI, G.; “Fluidodinâmica em Sistemas Particulados”, 2a edição, Rio de Janeiro, E-Papers Serviços Editoriais, 2002.
- McCABE, W.L., SMITH, J.C., HARRIOT, P.; “Unit Operations of Chemical Engineering” 5th Edition, MCGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS, 1993.
- OUTMANS, H.D., 1963, “Mechanics of Static and Dynamic Filtration in the Borehole”. In: SPE Journal Trans. AIME, 228, PP. 236-244.
- PEDEN, J.M., ARTHUR, K.G., MARGARITA AVALOS. “The Analysis of Filtration Under Dynamic and Static Conditions”, Society of Petroleum Engineers of AIME, SPE 12503, Bakersfield, CA, February 13-14, 1984.
- WALDMANN, A.; ANDRADE, A.R.; MARTINS, A.L.; LOMBA, R.F.T.; ARAGÃO, A.F.L.; “Sobre os Mecanismos Responsáveis por Minimizar a Invasão do Fluido de Perfuração na Rocha Reservatório”, ENAHPE 2006, Pedra Azul, Domingos Martins, 29 a 31 de agosto de 2006.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Petrobras, CNPq e FINEP o apoio financeiro recebido.



SPE 128035

A Theoretical and Experimental Analysis of Dynamic Filtration in Drilling Operations

C. M. Scheid, L. A. Calçada, C. A. O. Araújo, PPGEQ, Federal Rural University of Rio de Janeiro; A. T. A. Waldmann and A. L. Martins, SPE, PETROBRAS

Copyright 2010, Society of Petroleum Engineers

This paper was prepared for presentation at the 2010 SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control held in Lafayette, Louisiana, USA, 10–12 February 2010.

This paper was selected for presentation by an SPE program committee following review of information contained in an abstract submitted by the author(s). Contents of the paper have not been reviewed by the Society of Petroleum Engineers and are subject to correction by the author(s). The material does not necessarily reflect any position of the Society of Petroleum Engineers, its officers, or members. Electronic reproduction, distribution, or storage of any part of this paper without the written consent of the Society of Petroleum Engineers is prohibited. Permission to reproduce in print is restricted to an abstract of not more than 300 words; illustrations may not be copied. The abstract must contain conspicuous acknowledgment of SPE copyright.

Abstract

This paper describes a numerical filtration model validated by data obtained from an experimental dynamic filtration loop. The model predicts the filtercake buildup and filtrate flow rate in the drilling process using non-Newtonian muds. It is also able to calculate filtercake properties like permeability and thickness. The equations, written in cylindrical coordinate, are based on the motion and mass conservation equation of the fluid described by Darcy's law. In addition, the permeability and porosity are correlated to the filtercake pressure. The point at which the mud fluid shear rate and the filtercake shear strength are equal defines the filtercake thickness.

In the dynamic filtration loop there is a tube with a permeable wall where the carbonate suspension of different sized particles is filtrated. The suspension is homogenized in a tank mixer and pumped using a positive displacement pump. The filtration model was validated through experimental data. In this paper, we discuss the effects of cross-flow velocity and filtration pressure on the filtrate rate and filtercake buildup. The simulated data of filtrate rate and filtercake thickness agreed well with the experimental data.

Introduction

One of the drilling fluid's basic functions is to exert hydrostatic pressure over the permeable formations to avoid the formation fluid invasion to the well while the drilling operation takes place. The fluid pressure is normally kept above the formation pore pressure to prevent from kick events (formation fluid invasion to the well), that, in some cases, can lead to an uncontrolled influx (blowout). This concept, called overbalanced drilling, is traditionally employed in most of the drilling operations worldwide and in Brazil.

As the bit penetrates the reservoir rock, the drilling fluid invades the formation due to the positive pressure differential between the well and the reservoir rock. Portions of the liquid phase of the drilling fluid are lost to the adjacent formation while part of the solids presented in drilling fluid, constituted by particles smaller than the formation pore size, penetrate the rock during the fluid loss period, rapidly plugging the region around the well. Larger particles accumulate on the wellbore walls, initiating an external cake formation. The invasion of fluid and solid particles during this process causes damage to formation around the well.

Two invasion mechanisms are notable in the well. The first, called static filtration, occurs when the fluid pumping is interrupted and, from that point on, filtration occurs due to the difference between the hydrostatic pressure in the well and the reservoir pressure. The filtration rates are controlled by the continuously increasing thickness of the filter cake.

The other invasion mechanism, called dynamic filtration, occurs when the fluid is pumped through the well. In this process, the cake thickness is resultant from the dynamic equilibrium between solid particles deposition rate and the erosion rate due to the shear stresses generated by the fluid flow in the wellbore. Thus, the filtration rate to the formation tends to stabilize around a certain value while the cake thickness turns constant. Fig.1 illustrates the process.

Table 1 shows several authors that studied dynamic and static filtration phenomenon. Modeling and experimental work are listed.

Among the references quoted, some deal specifically with dynamic filtration modeling, as follows:

Corapcioglu and Abboud (1990) and Abboud (1993) presented a simplified modeling considering constant porosity and the average value for filtercake cake thickness. The result is a simple ordinary differential equation system which can be easily solved. Outmans (1963) presented a dynamic filtration model considering filter cake compressibility. Azari and Ershaghi (1980) solved numerically the equations proposed by Outmans (1963). Ferreira and Massarani (2005) proposed a model where axial and radial flows were solved de-coupled for Newtonian fluids. In the present paper, the focus is to generalize the model proposed by Ferreira and Massarani (2005), now for the non-Newtonian fluid flows. In order to evaluate these models, a dynamic filtration loop was built. The experimental set up and the models allow the prediction of the filtrate flow rate as a function of time in the cross flow filtration process. Additionally, dynamic filtercake properties such as equilibrium thickness, permeability, porosity, compressibility, and erosion resistance were determined

Dynamic filtration model for Newtonian fluids

For procedures involving Newtonian fluid, Ferreira and Massarani (2005) proposed the following filtration model. Fig. 2 shows the scheme that corresponds to the situation studied for those authors.

Two equations represent as Ferreira and Massarani (2005) model's basis – mass conservation and Darcy's Law for liquid and solid phases. Building from these two equations, the authors reached the resulting Eq. 1 written in cylindrical coordinates. By using this equation one can calculate, as a function of time, the filtration flow rate.

$$\frac{dt}{dv} = \frac{\mu_F}{(\Delta p)_f} \alpha \epsilon_s \rho_s r_m \left[\alpha \epsilon_s \rho_s r_t \ln \frac{r_t}{\left[r_t^2 - \frac{2c\rho_F r_t v}{\epsilon_s \rho_s} \right]^{1/2}} + R_m \right] \quad (1)$$

$$t = 0, v = 0.$$

In Eq. 1, t is the filtration time and v is the filtrate volume per unit of filtration area, μ_F is the fluid viscosity, α is the filtercake resistivity, ϵ_s is the filtercake porosity, Δp is the pressure drop in r direction, c is the suspension concentration, ρ_F and ρ_s are the fluid and solid density, respectively, r_t is the radius of the filter medium and R_m is the filter medium resistivity. Ferreira and Massarani (2005) considered that the average properties of the filtercake are function only of the filtration pressure. The integration of Eq. 1 results in Eq. 2

$$t = \frac{\mu_F}{(\Delta p)_f} \left\{ \alpha \epsilon_s \rho_s r_t \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{b^k}{2 \cdot k(k+1) \cdot r_t^{2k}} \cdot v^k + R_m \right\} \cdot v \quad (2)$$

$$b = \frac{2c\rho_F r_t}{\epsilon_s \rho_s}, \quad e(z,t) = \left[r_t^2 - \frac{2 \cdot c \cdot \rho_F \cdot r_t \cdot v}{\epsilon_s \rho_s} \right]^{1/2} \quad \text{and} \quad v = \frac{1}{2\pi r_m} \frac{dV}{dz}.$$

where, $e(z,t)$ is the filtercake thickness. In this case, the expression below allows the calculation of the total filtrate volume:

$$V(t) = \pi \cdot D_t \cdot \int_0^L v(z,t) \cdot dz, \quad (3)$$

where D_t is the pipe diameter and L is its length. The filtercake permeability k is related to the filtercake resistivity α and to the volumetric fraction of solids in the surface of the filtercake by Eq. 4. The filter medium resistance R_m is related to the filter medium permeability k_m and to the filter medium thickness ℓ_m by Eq. 5.

$$\alpha = \frac{1}{k \cdot \rho_s \cdot (1 - \varepsilon)} \quad (4)$$

$$R_m = \frac{\ell_m}{k_m} \quad (5)$$

Dynamic filtration model for non-Newtonian fluids

By generalizing from the model proposed by Ferreira and Massarani (2005) we proposed a new model for procedure with non-Newtonian fluid flows.

To derive an expression for the dynamic filtration of non-Newtonian fluids, one may begin by analyzing the shear stress imposed by a power-law its and its relation with the Darcy's equation. The shear stress by a power-law fluid is given by (Bird *et al.*, 1960).

$$\tau(\lambda) = M \cdot (\lambda^*)^n, \quad (6)$$

where M and n are the fluid consistency and behavior indexes and λ^* is the characteristic shear rate at the filtercake surface as a function of filtercake permeability k and filtrate flow rate q (Masarani, 1985),

$$\lambda^* = \frac{q}{\sqrt{k}}. \quad (7)$$

The effective viscosity μ_{ef} is calculated from the rheology of the suspension,

$$\mu_{ef} = \frac{\tau(\lambda^*)}{\lambda^*}. \quad (8)$$

Substituting Eq. 6 and 7 into Eq. 8:

$$\mu_{ef} = M \cdot \left(\frac{q_r}{\sqrt{k}} \right)^{n-1}. \quad (9)$$

Eqs.10 and 11 describe the Darcy's equation motion for the filtrate flowing through the filtercake and through the filter medium, respectively.

$$-\frac{dP}{dr} = \frac{\mu_{ef}}{k} \cdot q_r \quad \text{and} \quad (10)$$

$$-\frac{dP}{dr} = \frac{\mu_{ef}}{k_m} \cdot q_r \quad (11)$$

where k_m is the filter medium permeability and subscript r and m denote filtercake and filter medium, respectively. Solids mass balance for fluid and filtercake is considered in order to establish a correlation between the mud concentration c and the coordinates r and r_m . Figure 3 shows that r_m is defined at the surface of the filter medium and r at the filtercake surface.

$$c = \frac{\varepsilon_s \cdot \rho_s \cdot L \cdot \pi \cdot (r_m^2 - r^2)}{(2 \cdot \pi \cdot r_m \cdot L) \cdot v(z, t) \cdot \rho} = \frac{\varepsilon_s \cdot \rho_s \cdot L \cdot (r_m^2 - r^2)}{(2 \cdot r_m \cdot L) \cdot v(z, t) \cdot \rho} \quad \text{where} \quad (12)$$

ε_s is the filtercake porosity, ρ_s is the solid density, L is the filter length, and $v(z, t)$ is the derivative of the filtrate volume with

respect to filtration area, $v(z, t) = dv(z, t) / dA$.

Eq. 12 gives the relation between coordinate r and the internal radius of the filter medium, presented by Eq. 13,

$$r = \left(r_m^2 - \frac{2 \cdot c \cdot \rho \cdot r_m \cdot v(z, t)}{\epsilon_s \cdot \rho_s} \right). \quad (13)$$

The filtercake thickness is given substituting Eq. 13 into the relation $e(z, t) = r_m - r$, generating Eq. 14,

$$e(z, t) = r_m - \left[r_m^2 - \frac{2 \cdot c \cdot r_m \cdot v(z, t)}{\epsilon_s \rho_s} \right]^{1/2}. \quad (14)$$

The filtrate volume per unit of filtration area with the time, can be obtained by substituting Eq. 9 into Eq. 10,

$$-\frac{dP}{dr} = \frac{M}{k^{\frac{n+1}{2}}} \cdot q_r^n \quad (15)$$

Defining Eq. 16, and then combining it with Eq. 15, Eq. 17 is obtained.

$$q_r = \frac{dQ_f}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot dz} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r} \frac{dQ_f}{dz} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot Q_f^* \quad (16)$$

$$-\frac{dP}{dr} = \frac{M}{k^{\frac{n+1}{2}}} \cdot \left(\frac{Q_f^*}{2 \cdot \pi \cdot r} \right)^n \quad (17)$$

Eq. 18 is the result of integrating Eq. 17,

$$P - P_m = \frac{M}{k^{\frac{n+1}{2}}} \cdot \left(\frac{Q_f^*}{2 \cdot \pi \cdot r_m^n} \right)^n \cdot r_m^n \cdot \left(\frac{r_m^{1-n} - r^{1-n}}{1-n} \right). \quad (18)$$

By inserting Eq. 13 into Eq. 18, and knowing that at the internal filter medium wall $\frac{Q_f^*}{2 \cdot \pi \cdot r_m} = \frac{dv(z, t)}{dt}$, the filtercake pressure drop results in:

$$P - P_m = \frac{M}{k^{\frac{n+1}{2}}} \left(\frac{dv}{dt} \right)^n \cdot r_m^n \cdot \left(\frac{r_m^{1-n} - \left(r_m^2 - \frac{2 \cdot c \cdot \rho \cdot r_m \cdot v}{\rho_s \cdot \epsilon_s} \right)^{1-n}}{1-n} \right). \quad (19)$$

To obtain the average pressure drop in the filter medium, the same steps used to define Eq. 19 were followed starting by Eq. 11, generating Eq. 20,

$$P_m - P_{atm} = \frac{M}{k_m^{\frac{n+1}{2}}} \left(\frac{dv}{dt} \right)^n \cdot r_m^n \cdot \left(\frac{r_{ext}^{1-n} - r_m^{1-n}}{1-n} \right), \quad (20)$$

where r_{ext} is the external radio of the filtrate pipe.

Adding Eq. 19 to 20 gives the total pressure drop ($P - P_{\text{atm}}$), Eq. 21,

$$\Delta P_f = \frac{M}{k^{\frac{n+1}{2}}} \left(\frac{dv}{dt} \right)^n \cdot r_m^n \left(\frac{r_m^{1-n} - \left(r_m^2 - \frac{2 \cdot C \cdot \rho \cdot r_m \cdot v}{\rho_s \cdot \epsilon_s} \right)^{1-n}}{1-n} \right) + \frac{M}{k_m^{\frac{n+1}{2}}} \left(\frac{dv}{dt} \right)^n \cdot r_m^n \cdot \left(\frac{r_{\text{ext}}^{1-n} - r_m^{1-n}}{1-n} \right) \quad (21)$$

Finally, rearranging Eq. 21 to derive the filtrate model for a constant pressure filtration of power law mud:

$$\left(\frac{dv(t)}{dt} \right)^n = \frac{\Delta P_f}{\frac{M}{k^{\frac{n+1}{2}}} \cdot f_T(v(t)) + \frac{M}{k_m^{\frac{n+1}{2}}} \cdot f_M}, \quad (22)$$

$$t = 0, v = 0.$$

where,

$$f_T(v) = r_m^n \left(\frac{r_m^{1-n} - \{r(v)\}^{1-n}}{1-n} \right) \quad \text{and} \quad f_M = r_m^n \left(\frac{r_{\text{ext}}^{1-n} - r_m^{1-n}}{1-n} \right).$$

Experimental Setup

Fig. 4 shows this work's dynamic filtration loop. The loop consists of a pipe formed by a permeable wall which filtrates an aqueous suspension of different sized particles of calcium carbonate. In a tank of 0.5 m³, a one and half horsepower mixer homogenizes this suspension. A positive displacement one and half horsepower pump is responsible for fluid movement. To register the pressure drop, differential pressure gauges, in the ranges of 0-36 mmHg, 0-350 mmHg and 0-1800 mmHg, were placed along the surface of the in the filter medium. Thermocouples are used to measure the temperature of the system. A computer system continuously records, as a function of time, the weight of the filtrate squeezed out during the test into a tank atop a balance.

Our objective in these experiments is to understand the mud and filtercake characteristics that control filtration. As the objective is not to study the role of the filter permeability in filtration control, the use of a constant permeability medium was acceptable. The filtration medium with its known permeability consists of an industrial filtration tissue. A new filtration medium was used in each experiment.

Experiments and results

The experimental results validated the two models. By using the experimental crossflow filtration loop, it was possible to calculate two things: the filtercake properties and, as a function of time, the filtration flow rate. In these experiments, aqueous suspensions of calcium carbonate ranging in concentration from 2 to 6% (w/w) and pressures ranging from 1 to 2 Kg/cm² were used. The filter medium made out of polyester was changed after each experiment. This kind of filter is the same commonly used in the industry. The calcium carbonate suspension follows Newtonian laws. The experiments developed in the dynamic filtration loop consisted in the direct measurement of filtrate volume as a function of the filtration time. The experiments were run with controlled feed pressure and flow rate. The filtercake parameter like porosity, thickness and permeability were determined after each experiment.

Determination of filtercake parameter values

Evaluation of filtercake porosity and thickness

After each experiment, porosity is determined by immediately removing a sample of the filtercake formed on the filter medium from the filtration loop and measuring the wet weight. The filtercake is then heated to 105 °C for 24 hours to drive off all water. The porosity is given by

$$\epsilon_s = \frac{\left(\frac{\text{net wetweight}}{\text{net dryweight}} \right)}{\left(\frac{\text{net wetweight}}{\text{net dryweight}} + \frac{\rho_f}{\rho_s} \right)} \quad (23)$$

In this case, $\rho_f = 1,0 \text{ kg/m}^3$ and $\rho_s = 2,5 \text{ kg/m}^3$. The mean value of the experimental filtercake thickness is computed as

$$\bar{e} = \frac{\text{net dryweight}}{A(1-\epsilon_s)\rho_s} \quad (24)$$

where A is the filtration area.

Comparison between Newtonian and non-Newtonian models

In this analysis, results are plotted as t/v against v that is usual in analysis of dead-end filtration under constant pressure drop. Fig. 5 shows simulation results from the model proposed by Ferreira and Massarani (2005) and from the model proposed in this work. In the same condition, the procedure using non-Newtonian fluid reduces the volume of filtrate, verified by the increase of the inclination of the filtration data. This effect increases as the “n” parameter of the power law models decreases. When the parameters are set in n near 1 and $M = 0.01 \text{ g/cm.s}^{2-n}$ the model proposed in this work fit the data generated by the Newtonian model proposed by Ferreira and Massarani (2005). The non-Newtonian behavior shows that the removal of the condition of Newtonian fluid leads to a decrease in filtrate loss as shown by data from the pressure of 2.2 atm. Moreover, even for a non-Newtonian fluid ($n = 0.5$ and $M = 0.8 \text{ g/cm.s}^{2-n}$), the increase in pressure from 0.5 atm to 2.2 atm causes an increase on the filtrate flow.

Experimental evaluation of the cross-filtration parameters α and R_m

Fig. 6 shows the results t/v versus v from 9 experiments of cross flow filtration. The filtrate volume increases with the increase in the pressure as expected, except for the experiment 1 performed at 1 kgf/cm^2 which has similar results at 1.5 kgf/cm^2 .

Using $k = 1$ on Eq. 2 the relation between t/v versus v is linear. Table 2 shows the results of the parameter α and R_m for the 9 experiments estimated using Eq. 2. In order to evaluate the experimental error, we performed the experiments 3, 4 and 5 under the same conditions. These results show that the average $\alpha = 6.23 \pm 1.18 \text{ cm/g}$ and $R_m = 3.09 \pm 0.18 \text{ 1/cm}$, which represents a deviation, on average, 19% for α and 6% for R_m .

In the next step, with n close to 1, the experimental results with the numerical results from Eq. 22 (Figs. 7 to 9) are compared. Using the Euler scheme, Eq. 22 is solved to move the numerical solution forward in time. The parameters α and R_m obtained using Eq. 2 and Eq. 22 are close with less than 5% on deviation between them. In these cases, there is a good agreement between model and experimental data. Moreover, Eq. 22 is able to predict the initial filtrate flow. This is important in evaluating how the drilling fluid invades the reservoir.

Fig. 9 presents a study of parametric sensitivity of the filtercake resistivity. In this case, the parameter varied about 20% of the value obtained experimentally.

Erosion of filtercake will occur when the shear stress imposed by circulating mud at the cake surface exceeds the shear strength of the filtercake at that level. The shear stress imposed by a power-law mud is accounted by Eq. 6. Two components define the shear strength of the filtercake (Dewan and Chenevert, 2001),

$$\tau_c = \tau_{co} + f \cdot \tau_g \quad (\text{dynes/cm}^2) \quad (25)$$

The first term on the right is the shear strength with zero pressure across the filtercake and the second term is the additional strength contributed by the applied pressure. The second term tends to hold the particles together. The parameter f is the coefficient of friction and the parameter τ_g is the grain-grain stress resulting from the applied pressure. Outmans (1963) gave one approximation for the grain-grain stress

$$\tau_g = 68950 \cdot P_m \cdot \left(\frac{d}{e(z,t)} \right)^{\frac{1}{1-v}} \quad (\text{dynes/cm}^2) \quad (26)$$

where P_m is in psi, d is mean particle diameter and v is the compressibility exponent. Fig. 10 shows the mud solid particle size distribution of the calcium carbonate (2.7 g/cm^3 , Perry, 1953) used in suspension obtained with Malvern Laser Particle Size equipment (MALVERN® 2000). Typically, this diameter is in the range of 1 to 10 microns.

The filtercake parameter was determined by non linear regression using experimental data obtained in the condition presented in Table 2. Simulating the filtration plot with the 9 experiments gave $f = 150$, $\tau_{co} = 200$ and $v = 0.9$. Figure 11 shows the mean results of experimental shear stress and shear strength (Eq. 25) for 9 experiments presented in Table 2. The erosion occurs when the shear stress imposed by circulating mud exceeds the shear strength of the filtercake. In this case, the average value of the thickness was 1.5 mm and the model fitted the experimental thickness with less than 10% in deviation.

Conclusion

This paper presents a new model that simulates, in cylindrical coordinates, the invasion of non-Newtonian fluids in reservoirs, in the presence of bridging agents. The present model (for non-Newtonian fluids) and that of Ferreira and Massarani (2005) (for Newtonian fluids) were validated with an experimental cross filtration loop and Newtonian fluids containing bridging agents. The results showed that both models can be used to simulate the invasion of fluids in reservoirs, and even give information about the filtercake thickness buildup. The present model is equivalent to Ferreira and Massarani (2005) when the power law parameter n tends to one. Future experiments will be run with polymeric fluids with solids to validate the non-Newtonian dependency. The result is an useful tool for optimizing bridging agent composition for drill in fluids.

Acknowledgments

We gratefully acknowledge the financial support provided by PETROBRAS and by CAPES BEX 3726/08-8 and by CNPq.

Nomenclature

A – filtration area
 c – suspension concentration
 D_t – pipe diameter
 k_m –porous medium permeability
 k – cake permeability
 L – length of filtration section
 M – fluid consistency index
 n - fluid behavior index
 P – pressure inside the pipe
 P_m – pressure at filtercake
 q - filtrate flow rate
 q_r - filtrate flow rate at filtercake
 R_m – porous medium resistivity
 r – radius at filtercake surface
 r_m – pipe (tube) radius
 r_{ext} – external radius pipe
 t –filtration time
 v –volume of filtration volume per filtration area
 V – total filtration volume

Greek Letters

α – filtercake resistivity
 ε – filtercake porosity
 ε_s – filtercake solid porosity
 λ^* - characteristic shear rate at filtercake surface
 ℓ_m –porous media thickness
 μ_f – viscosity of the fluid
 ΔP_t – total pressure drop
 ρ_s – solid density

ρ – liquid density
 τ – shear stress

References

- AUDIBERT, A., ARGILLIER, J. F., LADVA, H. K. J., et al., 1999, “ Role of polymer on formation damage”, In: SPE European formation damage conference, SPE 54767, the Hague, Holanda, 31-1 June.
- AZARI, M. and ERSHAGHI, I., 1980, “Modeling of Filter Cake Buildup Under Dynamic-Static Condiitons”, In: SPE Annual California Regional Meeting, SPE 8902, held in Los Angeles, California, 9-11 April.
- BIRD, R.B., STEWART, W.E. AND LIGHTFOOT, E.N. “Transport Phenomena”, John Wiley & Sons, 1960.
- CORAPCIOGLU, M. and ABOUD, N., 1993, “Numerical Solution and Sensitivity Analysis of Filter Cake Permeability and Resistance to Model Parameters”, In: Transport in Porous Media, Vol 10, p 235-255.
- DEGOUY, D., 1991, “Design of Environmentally Safe Drilling Fluids: Tests Under Actual Bottomhole Conditions in an Original Flow Loop”. SPE Inc. Offshore Europe Conference, SPE 23063, Aberdeen, Schotland, 3-6 September.
- DEWAN, J.T. and CHENEVERT M.E.; A model for filtration of water-base mud during drilling: determination of filtercake parameters, *Petrophysics*, vol 42, n. 3, p. 237-250, 2001.
- FERREIRA, A.S; MASSARANI, G.; Physico-mathematical modeling of crossflow filtration, *Chemical Engineering Journal*, 111, 199-204, 2005.
- JIAO, D., SHARMA, M.M, 1992, “Formation Damage Due to Static and Dynamic filtration of Water-Based Muds”, SPE International symposium on Formation Damage Control, SPE 23823, Lafayette, 26-27 February.
- LIU, X., CIVAN, F., 1993, “A Multiphase Mud fluid Infiltration and filter Cake formation model”, In: SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, SPE 25215, New Orleans, EUA, 2-5 March
- LONGERON, D.G., ALFENORE, J., POUX-GUILLAUME, G., 1998, “Drilling Fluids and Permeability Impairment: Performance Evaluation of Various Mud Formulations”. In: SPE Annual Technical conference and Exhibition, SPE 48988, New Orleans, EUA, 27-30 September.
- MASSARANI, G.; “Filtração”, *Revista Brasileira de Engenharia*, September 1985.
- OUTMANS, H.D. , 1963 , *Mechanics of static and dynamic filtration in the borehole*: Society of Petroleum Engineering Journal, vol. 3, n. 3, p. 230.
- PENG, S.J., PEDEN, J.M., 1992, “ Prediction of Filtration Under Dynamic Conditions”. In: SPE Intl. Symposium on formation Damage Control, SPE 23824, Lafayette, EUA, 26-27 February.
- PEDEN, J.M., ARTHUR, K.G., AVALOS. T., MARGARITA. R, 1984, “The Analysis of Filtration Under Dynamic and Static Conditions”, In: SPE Formation Damage Control Symposium, Bakersfield, California, 13-14 February.
- PERRY, J.H.; “Chemical Engineer’s Handbook”, R 660.2, P 463, 1953.
- SCHEID, C.M., MARTINS, A.L, MASSARANI, G., *Escoamento Axial de Fluido Não-Newtoniano em Duto com Paredes Permeáveis*. XXIX Enemp, São João del Rei, Brazil, 2001
- STAMATAKIS, K. and TIEN, C., 1993, “A Simple Model of Cross-Flow Filtration Based on Particle Adhesion”, *AIChE Journal*, 39-8, pp 1292-1302.
- XIAO, L., PIATTI, C., GIACCA, D., et al., 1999, “Studies on the damage Induced by Drilling Fluids in Limestone Cores”, In: SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, SPE 50711, Houston, EUA, 16-19 fevereiro.
- ZAMORA, M., LAI, D.T., DZIALOWSKI, A.K., 1990, “Innovative Devices for Testing Drilling Muds”. In: SPEDE, SPE 17240.
- WALDMANN, A. T. A. (2005), “Mecanismos que Governam a Efetividade de Agentes Obturantes no Controle da Invasão de Fluidos de

Perfuração na Rocha Reservatório de Petróleo”, M.S.c. Thesis, PUC – Rio, Mechanical Engineering Departament, 96p.

Table 1 – A reference summary for static and dynamic experiment studies.

References	Filtration
OUTMANS (1963)	Dynamic filtration
AZARI AND ERSHAGHI (1980)	Dynamic filtration
PEDEN <i>et al.</i> (1984)	Dynamic and static filtration
CORAPCIOGLU AND ABBOUD (1993)	Dynamic filtration
ZAMORA <i>et al.</i> (1990)	Dynamic filtration
DEGOUY <i>et al.</i> (1991)	Dynamic and static filtration
PENG E PEDEN (1992)	Dynamic filtration
JIAO E SHARMA (1992)	Dynamic filtration
STAMATAKIS E TIEN (1993)	Dynamic filtration
LIU and CIVAN <i>et al.</i> (1993)	Dynamic and static filtration
LONGERON <i>et al.</i> (1998)	Dynamic and static filtration
AUDIBERT <i>et al.</i> (1999)	Dynamic and static filtration
XIAO <i>et al.</i> (1999)	Dynamic and static filtration
SCHEID <i>et al.</i> (2001)	Dynamic filtration

FERREIRA E MASSARANI (2005)	Dynamic filtration
WALDMANN (2005)	Dynamic and static filtration

Table 2 - Parameter estimation on the cross flow filtration experiments

Experiment	c (p/p)	P (kgf/cm ²)	α (cm/g)	R_m (1/cm)	ϵ
1	0.0202	1	2.30E+08	2.62E+09	0.56
2	0.0203	2	3.46E+08	3.86E+09	0.54
3	0.0402	1.5	7.56E+08	2.89E+09	0.55
4	0.0398	1.5	5.98E+08	3.21E+09	0.56
5	0.0411	1.5	5.32E+08	3.18E+09	0.55
6	0.063	1	2.58E+08	2.48E+09	0.55
7	0.0588	2	6.60E+07	4.56E+09	0.54
8	0.041	1	3.75E+08	2.54E+09	0.57
9	0.0422	2	1.36E+08	4.24E+09	0.54

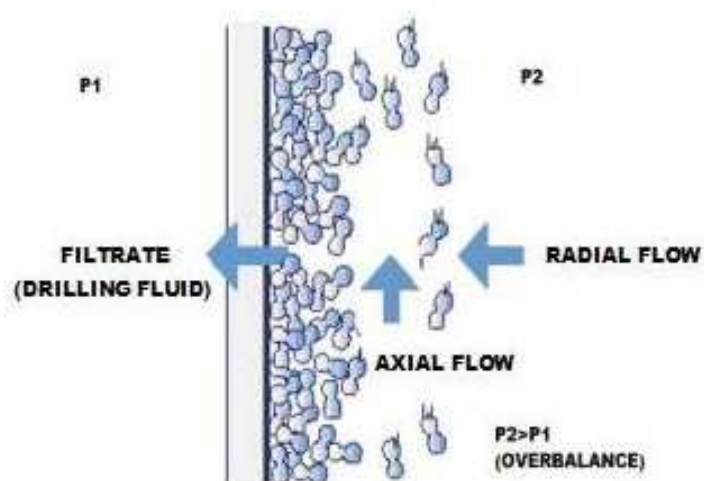


Fig. 1. A schematic for the filter cake buildup details in dynamic filtration.

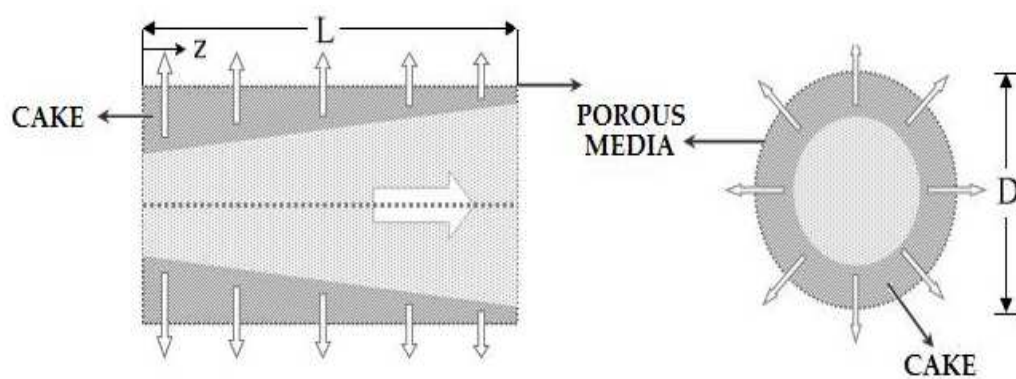


Fig. 2. Axial and radial flow diagram and filtercake buildup feature.

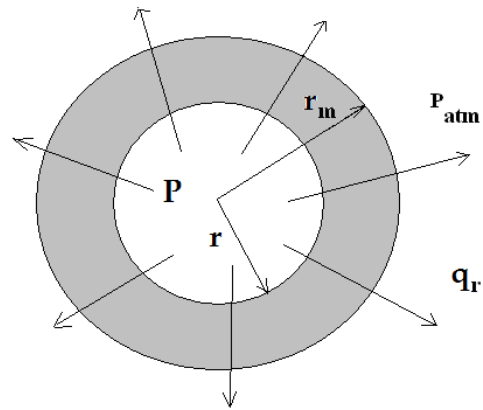
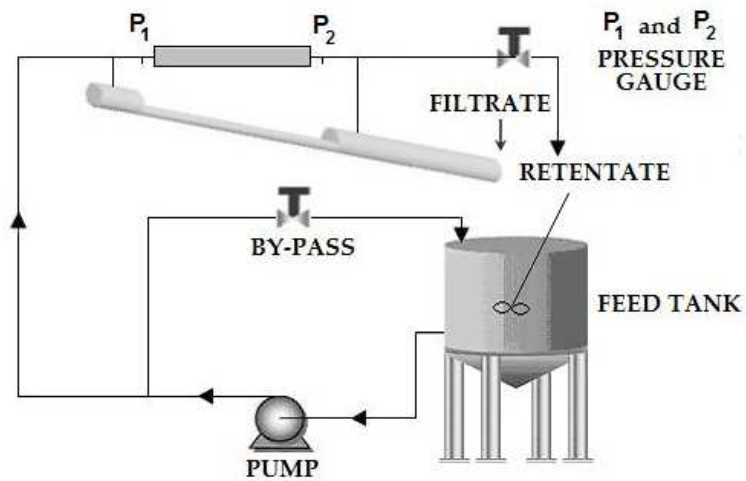
Fig. 3. Scheme of the filtercake buildup with thickness $e = r_m - r$.

Fig. 4. Dynamic cross flow filtration loop picture.

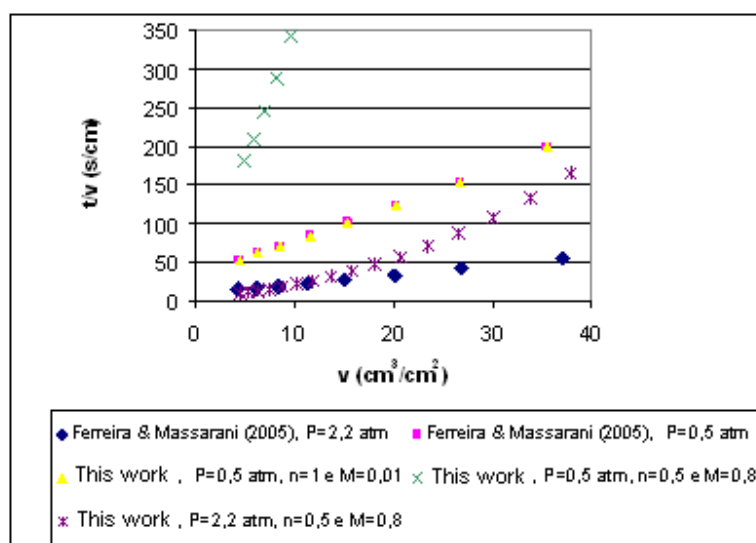


Fig. 5. Results generated using Newtonian and non-Newtonian models. In this case, $c = 0,032 \text{ g/g}$, $\varepsilon = 0,63$, $\rho_f = 1 \text{ g/cm}^3$, $\rho_s = 2,91 \text{ g/cm}^3$, $k = 2,1 \cdot 10^{-11} \text{ cm}^2$, $k_m = 4,8 \cdot 10^{-11} \text{ cm}^2$.

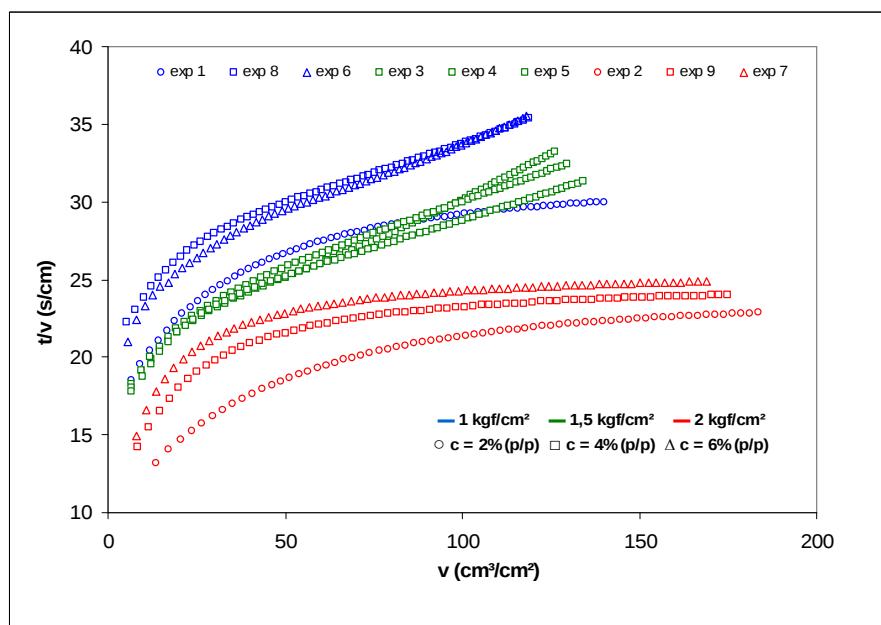


Fig. 6. Experimental results obtained in the cross flow filtration loop.

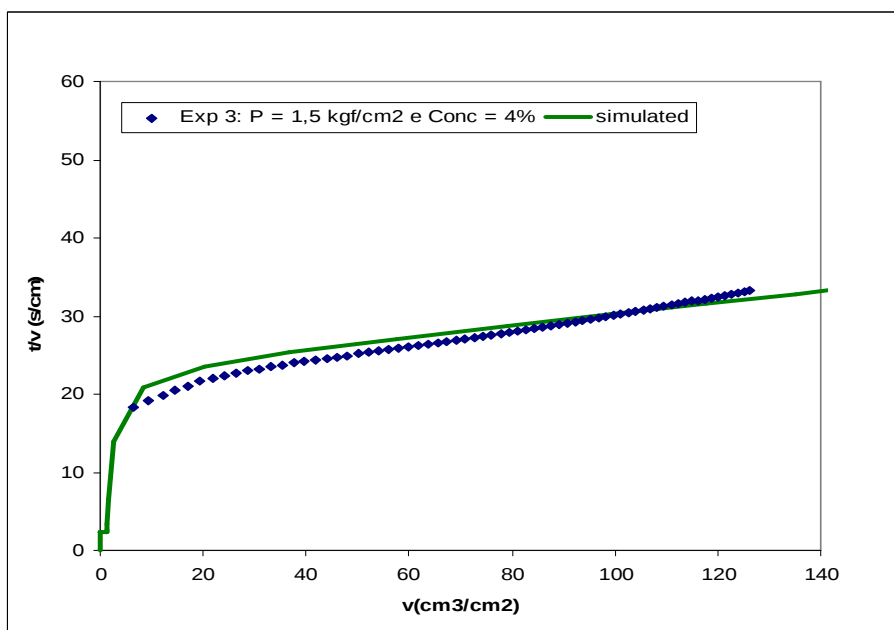


Fig. 7. Experimental and simulated data from experiment 3.

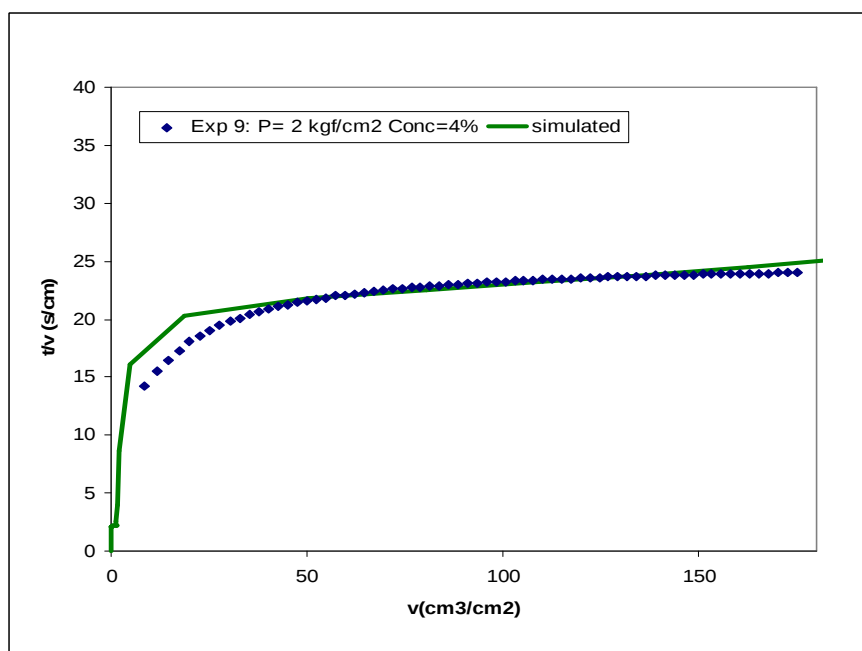


Fig. 8. Experimental and simulated data from experiment 9.

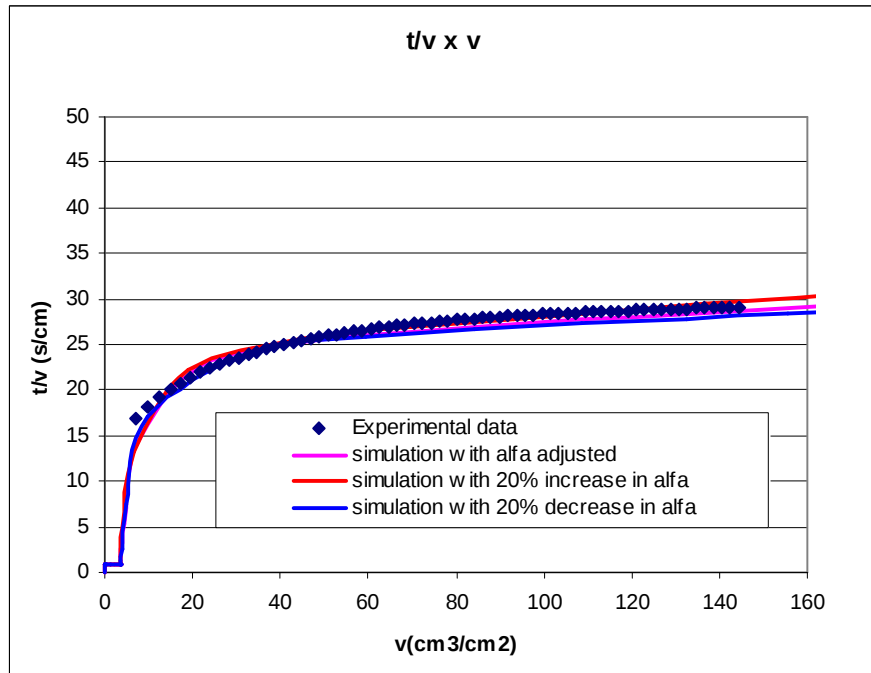


Fig. 9. Parametric sensitivity analysis with respect to the filtercake resistivity.

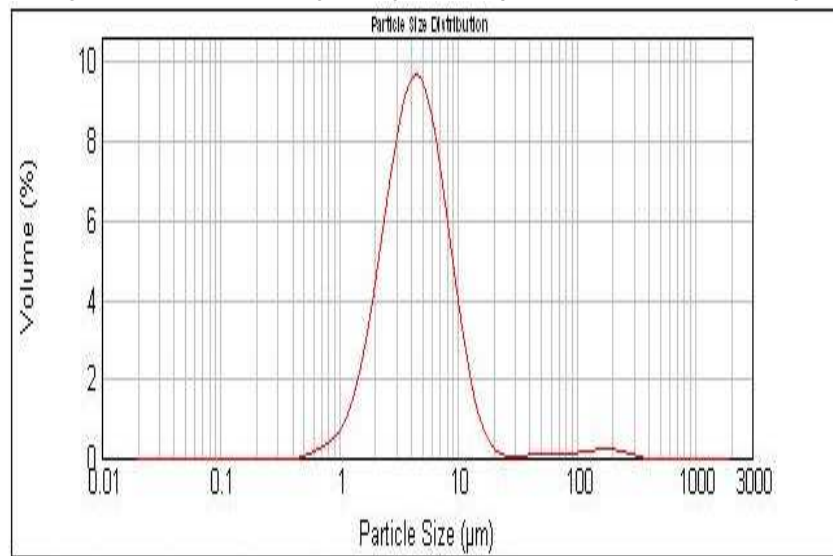


Fig. 10. Results obtained for the suspension particle-size distribution.

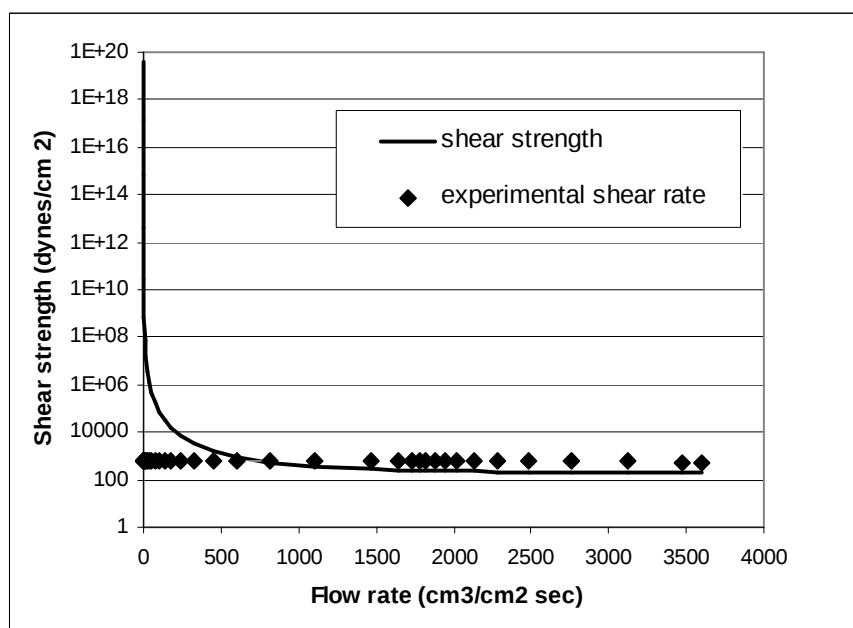


Fig. 11. Experimental and theoretical shear stress (Eq. 6) and shear strength (Eq. 25).

Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

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

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

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