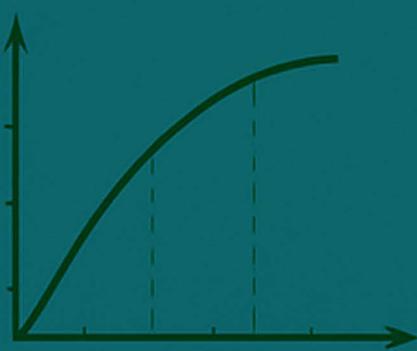
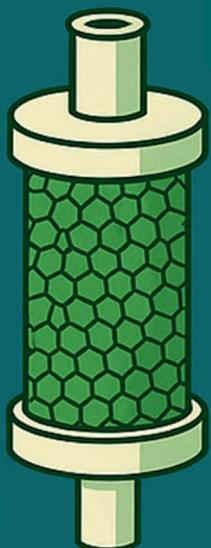
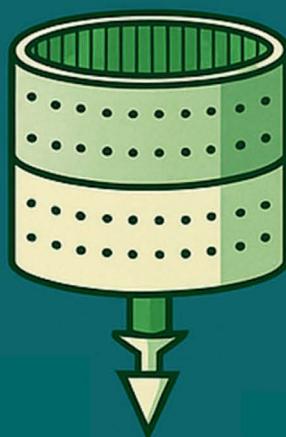
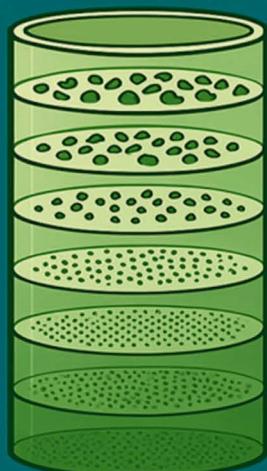
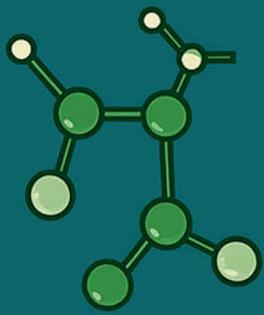


ORGANIZAÇÃO
FABIOLA DIAS DA SÍLVA CURBELO
IARA CAROLINE ASSUNÇÃO DORIGON
JOÃO PEDRO GONÇALVES DE SOUZA SOARES



OPERAÇÕES UNITÁRIAS NA ENGENHARIA QUÍMICA

UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL



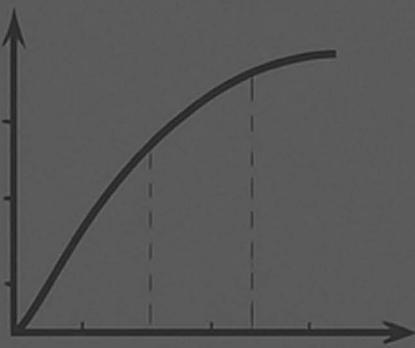
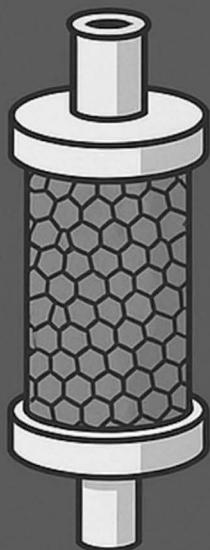
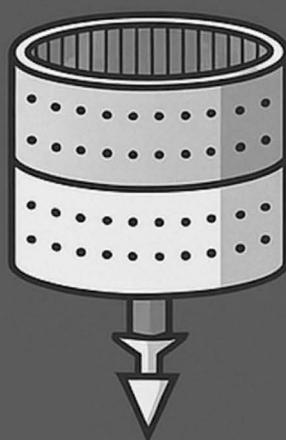
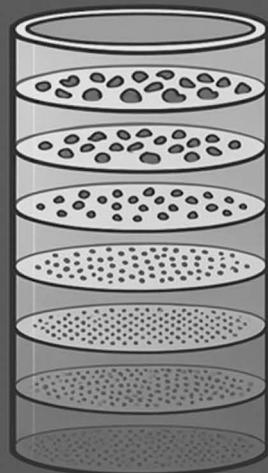
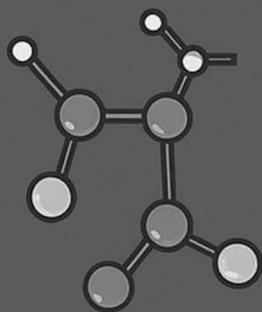
Atena
Editora
Ano 2025



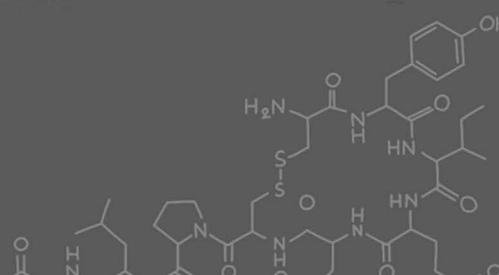
ORGANIZAÇÃO
FABIOLA DIAS DA SILVA CURBELO
IARA CAROLINE ASSUNÇÃO DORIGON
JOÃO PEDRO GONÇALVES DE SOUZA SOARES

OPERAÇÕES UNITÁRIAS NA ENGENHARIA QUÍMICA

UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL



 Atena
Editora
Ano 2025



2025 by Atena Editora

Copyright © 2025 Atena Editora

Copyright do texto © 2025, o autor

Copyright da edição © 2025, Atena Editora

Os direitos desta edição foram cedidos à Atena Editora pelo autor.

Open access publication by Atena Editora

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira Scheffer

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Yago Raphael Massuqueto Rocha



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob a Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

A Atena Editora mantém um compromisso firme com a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, assegurando que os padrões éticos e acadêmicos sejam rigorosamente cumpridos. Adota políticas para prevenir e combater práticas como plágio, manipulação ou falsificação de dados e resultados, bem como quaisquer interferências indevidas de interesses financeiros ou institucionais.

Qualquer suspeita de má conduta científica é tratada com máxima seriedade e será investigada de acordo com os mais elevados padrões de rigor acadêmico, transparência e ética.

O conteúdo da obra e seus dados, em sua forma, correção e confiabilidade, são de responsabilidade exclusiva do autor, não representando necessariamente a posição oficial da Atena Editora. O download, compartilhamento, adaptação e reutilização desta obra são permitidos para quaisquer fins, desde que seja atribuída a devida autoria e referência à editora, conforme os termos da Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Os trabalhos nacionais foram submetidos à avaliação cega por pares, realizada pelos membros do Conselho Editorial da editora, enquanto os internacionais passaram por avaliação de pareceristas externos. Todos foram aprovados para publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

Oprerações unitárias da Engenharia Química. Uma abordagem experimental

| Autores:

Fabiola Dias da Silva Curbelo
Débora Vitória Firmino Andrade Silva
Iara Caroline Assunção Dorigon
João Pedro Gonçalves de Souza Soares
José Cavalcante de Queiroz Neto
Luana Leite Ramos
Maria Eduarda Araújo Pessoa
Rafael Peixoto Alves
Ted Johnson Vasconcelos Leitão

| Revisão:

Os autores

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

O61 Operações unitárias da engenharia química. Uma abordagem experimental / Organizadores Fabiola Dias da Silva Curbelo, Iara Caroline Assunção Dorigon, João Pedro Gonçalves de Souza Soares. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2025.

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-65-258-3530-3
DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.303251707>

1. Engenharia química. I. Curbelo, Fabiola Dias da Silva (Organizadora). II. Dorigon, Iara Caroline Assunção (Organizadora). III. Soares, João Pedro Gonçalves de Souza (Organizador). IV. Título.

CDD 660

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora

📞 +55 (42) 3323-5493

📞 +55 (42) 99955-2866

🌐 www.atenaeditora.com.br

✉ contato@atenaeditora.com.br

CONSELHO EDITORIAL

CONSELHO EDITORIAL

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Prof^a Dr^a Amanda Vasconcelos Guimarães – Universidade Federal de Lavras
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Prof^a Dr^a Ariadna Faria Vieira – Universidade Estadual do Piauí
Prof. Dr. Arinaldo Pereira da Silva – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Cirênio de Almeida Barbosa – Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Cláudio José de Souza – Universidade Federal Fluminense
Prof^a Dr^a Daniela Reis Joaquim de Freitas – Universidade Federal do Piauí
Prof^a Dr^a. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Dr. Elio Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof^a Dr^a Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Prof. Dr. Fabrício Moraes de Almeida – Universidade Federal de Rondônia
Prof^a Dr^a Glécilla Colombelli de Souza Nunes – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Humberto Costa – Universidade Federal do Paraná
Prof. Dr. Joachin de Melo Azevedo Sobrinho Neto – Universidade de Pernambuco
Prof. Dr. João Paulo Roberti Junior – Universidade Federal de Santa Catarina
Prof^a Dr^a Juliana Abonizio – Universidade Federal de Mato Grosso
Prof. Dr. Julio Cândido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof^a Dr^a Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná
Prof^a Dr^a Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Prof. Dr. Sérgio Nunes de Jesus – Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia
Prof^a Dr^a Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

APRESENTAÇÃO

APRESENTAÇÃO

As operações unitárias na Engenharia Química são utilizadas na indústria para transformar matérias-primas em produtos de interesse. Cada operação unitária representa uma etapa específica e bem definida de um processo industrial, e essas etapas podem ser combinadas de forma conveniente para compor processos de transformação eficientes.

As Operações Unitárias são, geralmente, divididas em três grandes categorias, de acordo com os principais Fenômenos de Transporte que as fundamentam e são predominantes. Desta forma, tem-se as Operações envolvendo Transferência de Quantidade de Movimento (mecânicas), como Filtração, Sedimentação, Centrifugação, Peneiramento, Transporte de fluidos e Agitação e Mistura; as Operações envolvendo Transferência de Calor (energia térmica), como Troca Térmica, Evaporação e Refrigeração; e as Operações envolvendo Transferência de Massa, como Destilação, Extração, Absorção, Adsorção e Secagem.

Este livro reúne práticas experimentais amplamente utilizadas no curso de Engenharia Química, com o objetivo de capacitar o leitor na execução dessas atividades de forma crítica e segura. Espera-se que este material sirva como um recurso valioso para a formação acadêmica e para a atuação profissional na indústria, contribuindo para o desenvolvimento de habilidades práticas essenciais ao engenheiro químico.

Agradecemos à Universidade Federal da Paraíba, especialmente ao técnico do Laboratório de Operações Unitárias - LOU, Rafael Peixoto Alves, e ao técnico do Laboratório de Petróleo - LaPet, Ted Johnson Vasconcelos Leitão, bem como aos estudantes Débora Vitória Firmino Andrade Silva, Iara Caroline Assunção Dorigon, João Pedro Gonçalves de Souza Soares, José Cavalcante de Queiroz Neto, Luana Leite Ramos e Maria Eduarda Araújo Pessoa, cujas valiosas contribuições, dedicação e entusiasmo tornaram possível a escrita deste livro. Agradecemos, também, ao CNPq, pelo apoio por meio da bolsa de Produtividade em Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora – DT2 concedida à professora Fabiola Dias da Silva Curbelo (Departamento de Engenharia Química, UFPB).

Os autores.



SUMÁRIO

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 1

PENEIRAMENTO 1

Fabiola Dias da Silva Curbelo
Iara Caroline Assunção Dorigon
João Pedro Gonçalves de Souza Soares
Maria Eduarda Araújo Pessoa
Rafael Peixoto Alves
Ted Johnson Vasconcelos Leitão

DOI <https://doi.org/10.22533/at.ed.3032517071>

CAPÍTULO 2 14

SEDIMENTAÇÃO 14

Fabiola Dias da Silva Curbelo
Débora Vitória Firmino Andrade Silva
Iara Caroline Assunção Dorigon
João Pedro Gonçalves de Souza Soares
Maria Eduarda Araújo Pessoa
Rafael Peixoto Alves
Ted Johnson Vasconcelos Leitão

DOI <https://doi.org/10.22533/at.ed.3032517072>

CAPÍTULO 3 23

REOLOGIA DE UM FLUIDO DE PERFURAÇÃO BASE 23

Fabiola Dias da Silva Curbelo
Iara Caroline Assunção Dorigon
João Pedro Gonçalves de Souza Soares
José Cavalcante de Queiroz Neto
Maria Eduarda Araújo Pessoa
Rafael Peixoto Alves
Ted Johnson Vasconcelos Leitão

DOI <https://doi.org/10.22533/at.ed.3032517073>

SUMÁRIO

SUMÁRIO

CAPÍTULO 4	34
FILTRAÇÃO DE UM FLUIDO DE PERFURAÇÃO BASE34
Fabiola Dias da Silva Curbelo	
Iara Caroline Assunção Dorigon	
João Pedro Gonçalves de Souza Soares	
Luana Leite Ramos	
Maria Eduarda Araújo Pessoa	
Rafael Peixoto Alves	
Ted Johnson Vasconcelos Leitão	
DOI: https://doi.org/10.22533/at.ed.3032517074	
Tabela de Conversão de Unidades	46
Tabela da Série de Peneiras Tyler	48



C A P Í T U L O 1

PENEIRAMENTO

Fabiola Dias da Silva Curbelo

Iara Caroline Assunção Dorigon

João Pedro Gonçalves de Souza Soares

Maria Eduarda Araújo Pessoa

Rafael Peixoto Alves

Ted Johnson Vasconcelos Leitão

1. INTRODUÇÃO

A operação de peneiramento é um processo de separação física muito utilizado em várias indústrias, tais como química, alimentícia, farmacêutica, mineração e construção civil. Para isso, o material heterogêneo, com tamanhos variados de partículas, deverá ser separado em frações homogêneas para se obter uma distribuição granulométrica (Geankoplis, 2003; McCabe; Smith; Harriott, 2005).

A importância do peneiramento vai muito além da simples separação de sólidos com base no tamanho das partículas. Essa operação exerce influência direta na eficiência e no desempenho de diversos processos subsequentes, como adsorção, filtração e extração. Todos esses processos são altamente sensíveis à faixa granulométrica do material utilizado, o que torna o peneiramento essencial para garantir a uniformidade do sistema e, consequentemente, a qualidade do produto (Perry; Green, 2018; Allen, 1997).

A área superficial de um material particulado está diretamente relacionada ao diâmetro médio de suas partículas. Quanto menores as partículas, maior será a área superficial disponível, o que favorece diversas operações, como adsorção, secagem, extração, filtração e reações químicas. Nesses casos, é fundamental realizar um estudo detalhado da relação entre o tamanho das partículas e o rendimento do processo, a fim de identificar as condições operacionais mais adequadas para maximizar a eficiência do sistema em análise (Mujumdar, 2014).

Existem diversos métodos para determinar a distribuição do tamanho de partículas, como peneiramento, sedimentação, difração a laser, microscopia óptica e espalhamento dinâmico de luz (também conhecido por DLS - *Dynamic Light Scattering*) (Allen, 1997; Perry; Green, 2018). A Tabela 1 mostra algumas características destes métodos.

Método	Faixa típica	Melhor aplicação
Peneiramento	40 mm – 125 mm (seco) Até 100 mm (úmido)	Materiais granulares. Materiais finos.
Sedimentação	1 mm – 100 mm	Partículas finas em líquidos.
Difração a laser	0,1 mm – 3 mm	Análise de ampla faixa.
Microscopia	< 0,1 mm – 1 mm	Análise detalhada da forma.
DLS	1 nm - 1 mm	Nanopartículas e biomoléculas.

Tabela 1. Características de alguns métodos de separação por tamanho de partículas.

O peneiramento, especificamente, é um processo de separação mecânica que pode ser realizado por via seca ou úmida. O peneiramento a seco é usado quando o material está seco e não há risco de geração de poeira ou aglomeração, sendo mais comum para materiais granulados de média a grossa granulometria. O peneiramento por via úmida é usado quando há partículas finas, menores que 100 mm, com tendência à aglomeração ou quando o processo exige controle de poeira. Neste caso, é possível utilizar água para dispersar as partículas e melhorar a eficiência da separação.

A operação é baseada na passagem do material particulado por peneiras confeccionadas com tela de abertura de malha controlada, ou seja, com abertura conhecida (Figura 1). Este processo apresenta vantagens como operação simples e baixo custo, alta capacidade de processamento em operações contínuas, boa reproduzibilidade e sem necessidade de reagentes químicos.



Figura 1. Peneiras com diferentes granulometrias (malhas).

A análise granulométrica por peneiramento de um material particulado consiste na determinação do tamanho das partículas sólidas, assim como da frequência com que as partículas ocorrem em uma determinada classe ou faixa de tamanho. Para isto, é preciso passar o material a ser analisado por uma série de peneiras com malhas progressivamente menores, onde cada uma retém uma parte da amostra (Figura 2).



Figura 2. Peneiras de diferentes granulometrias acopladas à mesa vibratória.

Cada fração é relacionada a duas peneiras, uma em que certa quantidade de material passa, denominada de fração passante (finos), e outra em que fica retida, denominada de fração retida (grossos). As quantidades retidas nas diversas peneiras são determinadas por pesagem e as respectivas frações retidas são calculadas dividindo-se a massa retida em cada peneira pela massa total da amostra (Equação 1).

$$\text{Fração retida} = x_i = \frac{m_i}{M} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que: x_i é a fração mássica retida (%), m_i é a massa retida na peneira (g) e M é a massa total da amostra (g).

O diâmetro médio das partículas de cada faixa granulométrica é determinado pela média aritmética das peneiras da faixa, conforme Equação 2.

$$\bar{D}_{faixa} = \frac{d_i + d_{i-1}}{2} \quad (\text{Equação 2})$$

Com os resultados do peneiramento, a partir da análise granulométrica, faz-se a representação dos resultados graficamente na forma diferencial ou análise por frequência; na forma acumulativa dos incrementos, expressando a fração acumulada de grossos (FAG) e fração acumulada de finos (FAF); e na forma de histograma.

Faz-se, também, a caracterização do material heterogêneo, através do cálculo do número de partículas da amostra, da área superficial, da superfície específica, assim como de algumas médias definidas para materiais constituído de partículas irregulares, como diâmetro médio aritmético, muito utilizado na filtração; diâmetro médio superficial, apropriado para o estudo do escoamento de fluidos através de meios porosos; diâmetro médio volumétrico, importante para o controle de qualidade de materiais pulverulentos; diâmetro médio de Sauter, utilizado em cinética e catálise no estudo de transferência de massa e de reações químicas; e a média linear dos diâmetros, importante no estudo da evaporação de gotículas no seio de gases.

Características de materiais heterogêneos a partir da análise granulométrica

Cálculo do número de partículas:

O cálculo do número de partículas, a partir dos dados da análise diferencial, pode ser feito através da Equação 3 (McCabe; Smith; Harriott, 2005; Geankoplis, 2003).

$$N_i = \sum_i^n \frac{m}{\rho_S C_i D_i^3} \quad (\text{Equação 3})$$

Em que: N é o número total de partículas (adimensional); m é a massa da amostra (g); ρ é a massa específica (g/cm^3); x é a fração mássica (adimensional), C é o fator de forma, sendo $\pi/6$ para partículas esféricas e D é o diâmetro médio (cm). Se C e ρ_s forem considerados constantes para todas as frações da amostra, tem-se:

$$N_i = \frac{m}{\rho_s C} \sum_i^n \frac{x_i}{D_i^3}$$

Na Equação 3, o somatório corresponde a todas as frações da amostra, inclusive a amostra da bandeja. E ela vale, igualmente, para uma parte da amostra, desde que se mudem os limites do somatório. Por exemplo, para as frações retidas entre as peneiras "L" e "K" (inclusive), tem-se:

$$N_{L,K} = \frac{m}{\rho_s C} \sum_L^K \frac{x_i}{D_i^3}$$

O número de partículas de uma análise granulométrica fornece uma compreensão mais detalhada do comportamento do material particulado, especialmente quando as propriedades de interesse não dependem apenas da massa ou do volume, e sim da quantidade absoluta de partículas presentes.

Em operações como adsorção, catálise heterogênea, reações químicas de superfície e troca iônica, o número de partículas afeta a quantidade de área superficial disponível, que é proporcional ao número de partículas, considerando um tamanho fixo.

No caso de emulsões, suspensões ou dispersões coloidais, o número de partículas influencia diretamente na viscosidade, na estabilidade da suspensão e na taxa de sedimentação. E, mesmo que esteja com a mesma massa, suspensões com partículas menores têm mais partículas o que acarreta numa maior interação entre elas. Além disso, uma suspensão pode ter mais partículas de tamanho menor do que outra, e, com isso, apresentar diferenças no comportamento mecânico, químico ou físico, que só será entendido ao comparar o número real de partículas. Desta forma, verifica-se que massas iguais não significam, obrigatoriamente, em comportamentos iguais.

Cálculo da área superficial das partículas:

O cálculo da área superficial das partículas (S), a partir dos dados da análise diferencial, pode ser feito através da Equação 4 (Allen, 1997; Geankoplis, 2003).

$$S = \lambda \frac{m}{\rho_s} \sum_i^n \frac{x_i}{D_i} \quad (\text{Equação 4})$$

O cálculo da área superficial das partículas é muito importante em catálise, em reações heterogêneas, como sólido – líquido ou sólido – gás, que ocorrem na superfície das partículas. Neste caso, quanto maior a área superficial total, maior a disponibilidade de sítios reativos. Também, é importante em processos como secagem e adsorção, pois afetam a velocidade da transferência de massa e calor, uma vez que são fortemente dependentes da área superficial disponível para o contato com o fluido.

Em operações de filtração e em reações químicas, a área superficial das partículas influencia na porosidade meio poroso formado, como o empacotamento em reatores ou filtros, na distribuição de poros e na capacidade de compactação. A área superficial das partículas, também, pode ser medida experimentalmente por BET (Brunauer-Emmett-Teller) com adsorção de gás, geralmente N₂.

O cálculo da área superficial traz muitos benefícios em diversos aspectos, pois otimiza as reações químicas e os processos de filtração, com a finalidade de projetos processos mais eficientes; melhora as formulações garantindo um controle melhor das soluções; avalia o desempenho de materiais como catalisadores e pigmentos; e controla a agregação, a viscosidade e a sedimentação de dispersões.

Cálculo da superfície específica das partículas:

O cálculo da área superficial das partículas (\bar{S}), a partir dos dados da análise diferencial, pode ser feito através da Equação 5 (Perry; Green, 2018).

$$\bar{S} = \frac{s}{m} = \frac{\lambda}{\rho_s} \sum_i^n \frac{x_i}{D_i} \quad (\text{Equação 5})$$

Este parâmetro é fundamental em diversos processos, pois fornece uma medida da área total disponível por unidade de massa do material particulado. Quanto maior a superfície específica, maior a velocidade de reações químicas heterogêneas e maior a taxa de adsorção, absorção e troca iônica. Um aumento da superfície específica aumenta a eficiência dos catalisadores, carvões ativados e resinas de troca iônica; melhora a remoção da umidade e aumenta a velocidade de filtração.

Medidas características de material particulado:

Vários tipos de médias podem ser definidos para um dado material constituído de partículas irregulares, como (Perry; Green, 2018; Allen, 1997):

Diâmetro médio aritmético (\bar{D}_a)

O cálculo do diâmetro médio aritmético das partículas, a partir dos dados da análise diferencial, pode ser feito através da Equação 6.

$$\bar{D}_a = \frac{\sum_i^n \frac{x_i}{D_i^2}}{\sum_i^n \frac{x_i}{D_i^3}} \quad (\text{Equação 6})$$

O diâmetro médio aritmético de partículas é uma das maneiras mais simples de se representar o tamanho médio das partículas em uma amostra. É a média dos diâmetros das partículas, sem considerar massa ou volume, apenas o número de partículas em cada faixa. Serve de referência para avaliar dispersão, polidispersão e desvio padrão.

Diâmetro médio superficial (\bar{D}_s)

O cálculo do diâmetro médio superficial das partículas, a partir dos dados da análise diferencial, pode ser feito através da Equação 7.

$$\bar{D}_s = \sqrt{\frac{\sum_i^n \frac{x_i}{D_i}}{\sum_i^n \frac{x_i}{D_i^3}}} \quad (\text{Equação 7})$$

O diâmetro médio superficial das partículas é um parâmetro granulométrico que representa o diâmetro de uma partícula esférica que teria a mesma área superficial média que as partículas reais da amostra. Ele leva considera tanto o número de partículas quanto a sua área superficial individual, sendo muito importante em processos em que a área de contato das partículas é relevante, uma vez que esta controla a eficiência do processo, como em adsorção, secagem, extração sólido-líquido e catálise heterogênea.

Diâmetro médio volumétrico (\bar{D}_v)

O cálculo do diâmetro médio volumétrico das partículas, a partir dos dados da análise diferencial, pode ser feito através da Equação 8.

$$\bar{D}_v = \sqrt[3]{\frac{1}{\sum_i^n \frac{x_i}{D_i^3}}} \quad (\text{Equação 8})$$

O diâmetro médio volumétrico das partículas representa o diâmetro de uma partícula esférica que teria o mesmo volume médio que as partículas reais da amostra. Ele é uma das médias mais importantes em análises granulométricas, pois está diretamente relacionado ao volume ou massa das partículas e, por isso, é amplamente usado em operações industriais e de engenharia. Ele está diretamente relacionado ao volume individual de partículas, e é útil para estimar volume total de sólidos e taxas de sedimentação.

Diâmetro médio de Sauter ($\bar{D}_{s'}$)

O cálculo do diâmetro médio de Sauter, a partir dos dados da análise diferencial, pode ser feito através da Equação 9.

$$\bar{D}_{s'} = \frac{1}{\sum_i^n \frac{x_i}{D_i}} \quad (\text{Equação 9})$$

O diâmetro médio de Sauter, também conhecido como diâmetro médio superfície-volume, é um parâmetro muito importante em análises granulométricas, pois representa o diâmetro de uma partícula esférica que tem o mesmo volume e a mesma área superficial média que as partículas reais.

É especialmente útil, quando há interesse em processos em que tanto o volume quanto a superfície das partículas são importantes, já que ele expressa efetivamente quanto de área superficial está disponível por unidade de volume de partícula. Sendo importante em secagem, adsorção, e reações heterogêneas sólido-fluido.

Média linear dos diâmetros ($\bar{D}_{a'}$)

O cálculo da média linear dos diâmetros, a partir dos dados da análise diferencial, pode ser feito através da Equação 10.

$$\bar{D}_{a'} = \frac{\sum_i^n \frac{x_i}{D_i}}{\sum_i^n \frac{x_i}{D_i^2}} \quad (\text{Equação 10})$$

A média linear dos diâmetros é uma forma básica de representar o tamanho médio das partículas, calculada a partir da soma dos diâmetros multiplicados pela fração de partículas, por número ou massa, em cada classe.

Quando não há necessidade de alta precisão, a média linear pode ser usada para estimar a altura de leito fixo; fazer projeções de tempo de residência e comparar o nível de fragmentação num processo de moagem.

2. OBJETIVOS

Muitos processos, como adsorção, filtração e reações químicas, exigem faixas específicas de tamanho de partículas para que possam funcionar corretamente, desta forma os objetivos principais da prática de “Peneiramento” são:

1. Obter frações de materiais com tamanho uniforme, ou seja, separar em faixas de tamanho definidas;

2. Construir as curvas de análise granulométrica de frequência diferencial, análise acumulativa e histograma, para facilitar a análise do perfil de distribuição de tamanhos;
3. Calcular o número de partículas da amostra, assim como os diâmetros médios característicos de materiais heterogêneos.

3. METODOLOGIA

Para o experimento de peneiramento realizado em laboratório, que consiste em passar o material a ser analisado por uma série de peneiras com malhas progressivamente menores, onde cada uma retém uma parte da amostra, deve-se limpar cuidadosamente e pesar cada peneira da série a ser utilizada. Sobre a bandeja inicial, chamada de peneira cega, empilha-se as outras peneiras começando com a de menor abertura da malha. Posteriormente, o conjunto de peneiras, adequadamente empilhadas, devem ser acopladas à mesa agitadora.

Inicia-se o experimento, inserindo a amostra desejada na primeira peneira empilhada, lacra-se com a tampa e prende-se todas elas firmemente ao agitador. Aciona-se o cronômetro e dá-se início a agitação por um determinado intervalo de tempo, de modo a garantir uma separação eficiente em cada faixa granulométrica.

Ao final, retira-se cada peneira e, por balanço de massa, determina-se a massa retida em cada uma delas. Com a massa contida em cada peneira, calcula-se a fração mássica pela Equação 1 e o diâmetro médio das partículas contidas em cada faixa granulométrica pela Equação 2.

Outros parâmetros importantes, dependendo da aplicação desejada, também, podem determinados pela análise granulométrica, como: número de partículas da amostra (Equação 3), diâmetro médio aritmético (Equação 6), diâmetro médio superficial (Equação 7), diâmetro médio volumétrico (Equação 8), diâmetro de Sauter (Equação 9), média linear dos diâmetros (Equação 10).

4. ESTUDO DE CASO

Uma massa de 300 g de material heterogêneo composto de pó da concha de molusco (PCM) foi peneirada com o seguinte conjunto de peneiras da série Tyler: 4 #, 14 #, 24 #, 35 #, 65 # e bandeja cega. Os resultados da análise granulométrica estão apresentados na Tabela 2.

Peneiras Tyler	Diâmetro (mm)	Faixa granulométrica	Massa peneira (g)	Massa peneira com amostra (g)	Massa retida (g)	Diâmetro médio (mm)	Fração retida (%)	FAG (%)	FAF (%)
4	4,699	0+4	394,6	396,0	1,5	4,699	0,49	0,49	99,51
14	1,168	-4+14	379,2	414,8	35,6	2,934	11,85	12,34	87,66
24	0,701	-14+24	370,6	412,0	41,4	0,935	13,79	26,13	73,87
35	0,417	-24+35	363,4	420,6	57,2	0,559	19,06	45,19	54,81
65	0,208	-35+65	358,8	473,6	114,8	0,313	38,27	83,46	16,54
bandeja	0	-65 + bandeja	329,8	379,4	49,6	0,104	16,54	100,00	0,00

Tabela 2. Dados da análise granulométrica por peneiramento.

Dos resultados da Tabela 2, pode-se verificar como as partículas da amostra de PCM estão distribuídas por tamanho, indicando o percentual do material em cada faixa de diâmetro, pela fração retida. No caso, o maior percentual de retenção da amostra foi na faixa granulométrica de -35+65, com 38,3 % de retidos. Os termos fração acumulativa de grossos (FAG) e fração acumulativa de finos (FAF) mostram a distribuição do tamanho de partículas ao longo das peneiras e são usados para construir a curva de distribuição granulométrica acumulada.

Estes resultados são detalhados nos gráficos de distribuição em massa mostrando a análise de frequência (Figura 3), de fração acumulada (Figura 4) e do histograma (Figura 5), confirmando que o material é polidisperso, devido a sua heterogeneidade.

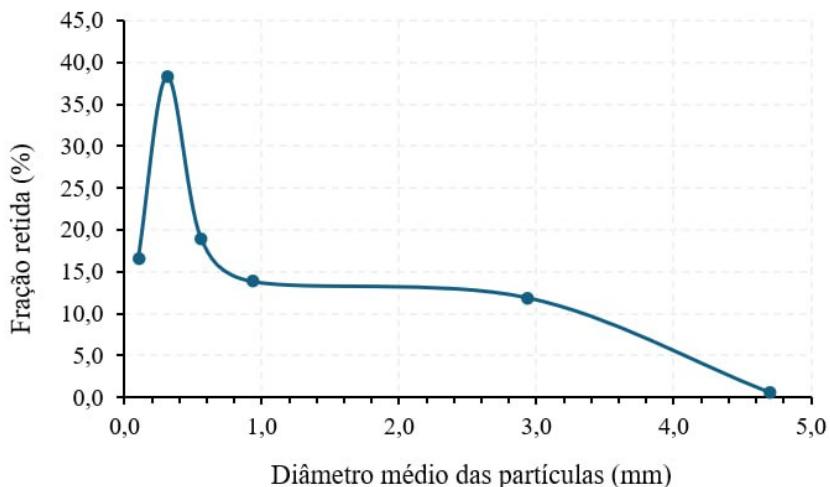


Figura 3. Análise granulométrica diferencial.

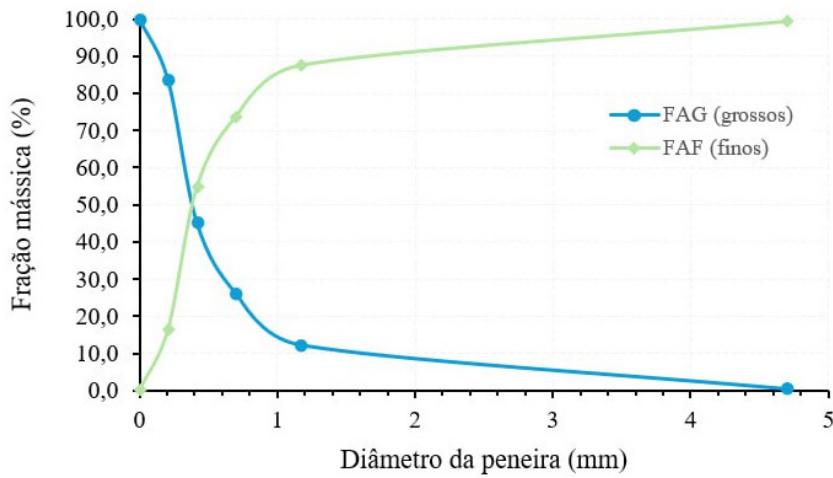


Figura 4. Distribuição granulométrica acumulada.

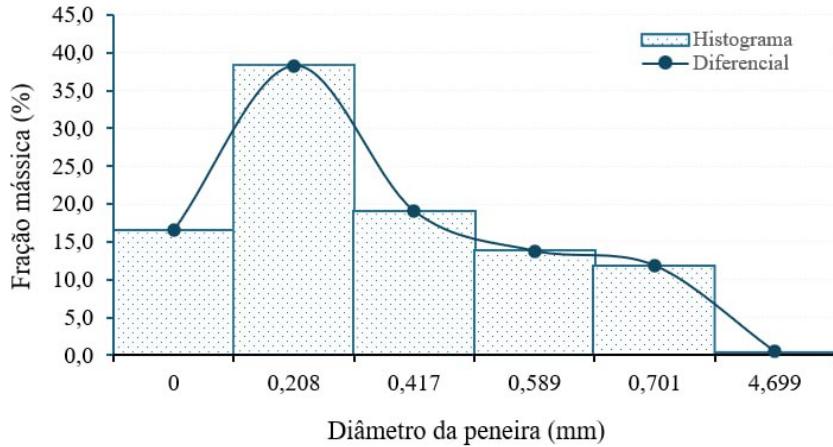


Figura 5. Histograma dos resultados.

Considerando partículas esféricas, com $C = \pi/6$, e a massa específica do PCM igual a $2,8 \text{ g/cm}^3$, foram calculados os principais parâmetros determinados a partir da análise granulométrica do PCM (Tabela 1).

Número de partículas	Diâmetro médio aritmético	Diâmetro Médio superficial	Diâmetro Médio volumétrico	Diâmetro de Sauter	Média linear dos diâmetros
$3,29\text{E+}07$	0,0124 cm	0,0144 cm	0,0184 cm	0,0299 cm	0,0167 cm

Tabela 3. Número de partículas e diâmetros médios da análise granulométrica por peneiramento.

A FAF indica a fração de material que passou pelas peneiras até um determinado tamanho e mostra a porcentagem fina acumulada e serve para identificar os D10, D50 e D90, que correspondem aos tamanhos em que 10 %, 50 % e 90 % das partículas passaram, respectivamente (Figura 6).

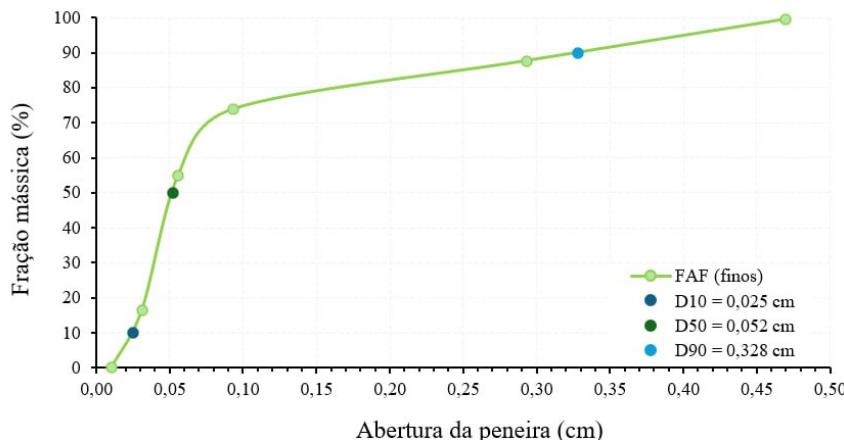


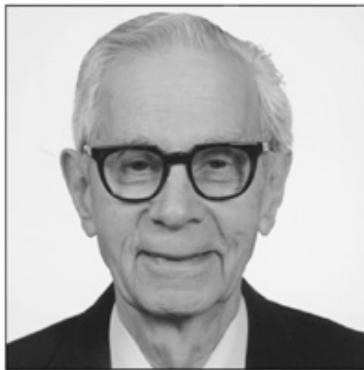
Figura 6. Dados de fração acumulada de finos com D10, D50 e D90.

QUESTIONAMENTOS AOS LEITORES

1. Como a escolha do conjunto de peneiras (tamanho das malhas) afeta os resultados da análise granulométrica?
2. Como a umidade do material pode influenciar o processo de peneiramento?
3. Por que certos cosméticos em pó têm partículas muito finas, e como isso influencia na aplicação da maquiagem? Você acredita que o tamanho das partículas influencia no resultado final do produto?
4. Como a granulometria impacta a eficiência de catalisadores sólidos em reatores químicos? Isso afeta a velocidade de reação em processos químicos industriais?

NOTÁVEIS CIENTISTAS EM OPERAÇÕES UNITÁRIAS

- Christie John Geankoplis (1921 – 2005)



(Geankolis, 2003)

Christie John Geankolis foi um engenheiro químico e professor norte-americano amplamente reconhecido por sua contribuição ao ensino e à sistematização das operações unitárias na engenharia química, com ênfase especial nos fenômenos de transporte e operações unitárias. Sua principal obra, o livro "*Transport Processes and Separation Process Principles*", tornou-se uma das referências mais importantes no ensino da engenharia química, adotado em universidades do mundo inteiro. Geankolis foi uma figura-chave na formação científica dos engenheiros químicos, oferecendo uma base sólida e acessível para o estudo das operações unitárias, incluindo as operações mecânicas como o peneiramento. Sua obra promoveu uma ponte entre o conhecimento teórico e a prática industrial, permitindo que estudantes e profissionais compreendam, dimensionem e otimizem processos de separação física com base no tamanho de partículas.

REFERÊNCIAS

ALLEN, T. Particle size measurement. 5. ed. Springer, 1997.

GEANKOPLIS, Christie J. Transport Processes and Unit Operations: United States Edition, 3. ed. Prentice Hall, 1993.

MCCABE, Warren L.; SMITH, Julian C.; HARRIOTT, Peter. Unit Operations of Chemical Engineering, 7. ed. McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 2004.

MUJUMDAR, Arun S. Handbook of industrial drying. 4. ed. CRC Press, 2014.

PERRY, Robert H.; GREEN, Don W. (Ed.). Perry's chemical engineers' handbook. 9. ed. McGraw-Hill, 2018.



C A P Í T U L O 2

SEDIMENTAÇÃO

Fabiola Dias da Silva Curbelo

Débora Vitória Firmino Andrade Silva

Iara Caroline Assunção Dorigon

João Pedro Gonçalves de Souza Soares

Maria Eduarda Araújo Pessoa

Rafael Peixoto Alves

Ted Johnson Vasconcelos Leitão

1. INTRODUÇÃO

A sedimentação, ou decantação, é uma das operações unitárias mais utilizadas na indústria química. Nesta operação, as fases sólida e líquida são separadas devido à diferença de densidade entre elas, sendo o processo baseado no gradiente de concentrações das fases presentes, sob a ação da gravidade. A sedimentação consiste em concentrar suspensões de sólidos em líquidos ou em purificar o líquido. Em geral, as partículas sólidas são mais densas do que a fase fluida, embora existam casos em que a decantação ocorra com sólidos ou líquidos presentes em gases (Gomide, 1983).

A sedimentação é muito realizada em operações de tratamento de água e esgoto, como por exemplo, para eliminar os sólidos dos esgotos ou ainda para clarificar o caldo de cana pela sedimentação de suas impurezas, separação de misturas líquido-líquido provenientes da etapa de extração com solvente de um sedimentador. Em muitos casos, esta operação é realizada para eliminar as partículas da corrente de um fluido para que ele fique livre de contaminantes, sendo comum classificar este tipo de sedimentador como clarificador. Em outros casos, o objetivo é recuperar as partículas (produtos), como por exemplo, isolar a fase dispersa de uma extração líquido-líquido, sendo comum classificar este tipo de sedimentador como espessador (Cremasco, 2018).

Fatores como a densidade do sólido e do líquido, diâmetro e forma das partículas e, ainda, a viscosidade do meio tendem a impactar na velocidade com que ocorre a sedimentação. Sendo a viscosidade afetada pela temperatura, é possível aplicar temperaturas maiores em certos casos para aumentar essa velocidade. Em sistemas coloidais, em que o movimento aleatório das partículas no fluido em conjunto com a repulsão elétrica entre elas promove a anulação da gravidade, o aumento do seu tamanho é essencial (Gomide, 1983).

Alguns parâmetros como o aumento do diâmetro das partículas, através da aglomeração da fase particulada a partir da coagulação e da floculação; o aumento da massa específica; e o aumento da velocidade terminal podem potencializar a velocidade final da operação de sedimentação (Cremasco, 2018).

Na indústria, a otimização deste processo é fundamental para melhorar a separação sólido-líquido, reduzindo custos operacionais e melhorando a qualidade dos efluentes tratados. E, com isso, a compreensão detalhada das fases da sedimentação contribui para o desenvolvimento de equipamentos mais eficientes, como clarificadores e espessadores (Foust, 1982).

Quando uma solução homogênea contendo partículas sólidas é deixada em repouso, no início do ensaio (t_0) a concentração da fase particulada é constante em todos os pontos ao longo da altura da proveta. A sedimentação ocorre através de um conjunto de fenômenos que resultam na separação das fases. Esse processo pode ser analisado em termos de regiões distintas, que variam em concentração e comportamento das partículas (Figura 1).

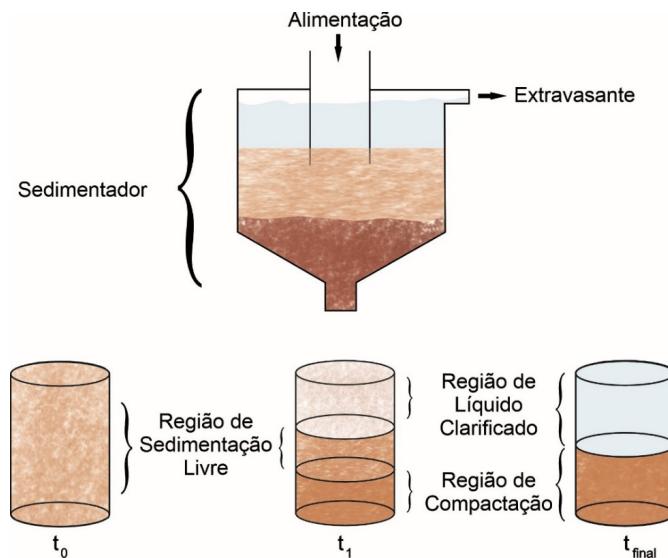


Figura 1. Regiões formadas na operação de sedimentação.

No decorrer do experimento, as partículas maiores ou mais densas começam a sedimentar e a formar uma camada fina de partículas no fundo da proveta, que é a região de compactação, formando uma interface bem definida entre o líquido clarificado e a zona de concentração uniforme. Tal região é formada por aglomerados mais concentrados e com maior velocidade de sedimentação.

Aglomerados finos (menos concentrados) sedimentam mais lentamente, originando uma região intermediária, que é a região de sedimentação livre. Quando todas as partículas atingem a base do sistema e se compactam, chega-se ao ponto de sedimentação crítico, onde a interface entre o líquido e os sólidos torna-se bem definida. A partir desse momento, o processo passa a ser dominado pela compressão dos sólidos e pela expulsão do líquido intersticial (Cremasco, 2018; Foust, 1982).

Kynch criou um método de desenvolvimento de um sedimentador baseado apenas na realização de um experimento. A partir de um ensaio de proveta, é possível obter pares experimentais de altura *versus* tempo, demonstrando o movimento da interface superior em uma operação de sedimentação em batelada.

Algumas hipóteses foram determinadas para a fundamentação, como por exemplo considerar uma sedimentação unidimensional, em que a concentração tende a aumentar no fundo do sedimentador com o decorrer do tempo. Com isso, a velocidade de sedimentação tende a zero uma vez que a concentração se aproxima do seu valor máximo. Neste caso, a velocidade de sedimentação é dependente apenas da concentração local das partículas e os efeitos de paredes são desconsiderados (Cremasco, 2018).

PROJETO DE UM SEDIMENTADOR

Para projetar um sedimentador em maior escala (*scale up*), é possível utilizar um dos métodos existentes, como o Método de Kynch. Neste método, o dimensionamento do sedimentador pode ser feito a partir de dados experimentais de altura de sedimentação da fase particulada *versus* tempo. A facilidade deste método está em poder utilizar apenas um experimento para o projeto do dimensionamento do sedimentador.

A área do sedimentador pode ser determinada utilizando a equação 1, em que é considerada a vazão volumétrica da suspensão alimentada ao sedimentador (Q_A), que será estimada; a concentração de sólidos da suspensão alimentada (C_A); a velocidade de decantação (v); a concentração da suspensão na zona limite (C) e a concentração da lama espessada (C_E).

$$A = \left(\frac{Q_A \cdot C_A}{v} \right) \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_E} \right) \quad (\text{Equação 1})$$

2. OBJETIVOS

Os objetivos principais da prática “Sedimentação” são:

1. Estudar a operação de sedimentação em batelada através do teste da proveta.
2. Determinar a velocidade de sedimentação de suspensões com diferentes granulometrias e concentrações de material particulado, como areia, carbonato de cálcio e pó da concha de marisco.
3. Utilizar as curvas de sedimentação construídas com dados experimentais para projetar um sedimentador em maior escala (*scale up*).

3. METODOLOGIA

Como exemplo de um experimento típico de sedimentação realizado em laboratório, pesa-se, uma determinada massa de material particulado de granulometria homogênea e apropriada; transfere-se o material pesado para uma proveta; acrescenta-se água destilada até o menisco da proveta; tampa-se a proveta e agita-a para homogeneizar todo o material contido nela. Após este preparo, coloca-se a proveta preenchida em um local adequado e inicia-se o cronômetro para a observação dos pares de sedimentação, altura de sedimentação *versus* tempo.

No decorrer do experimento, observa-se a formação das regiões de sedimentação. O experimento é finalizado quando é possível verificar a completa sedimentação/decantação/separação das fases líquida e particulada, conforme mostrado na Figura 2.

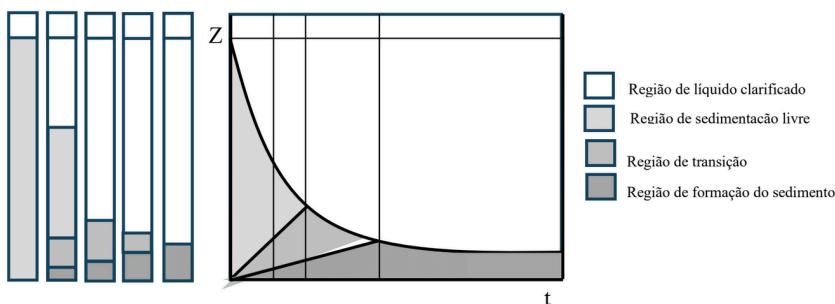


Figura 2. Regiões encontradas numa curva típica de sedimentação.

A partir do gráfico gerado, escolhe-se pontos na curva de sedimentação e, então, e traça-se as retas tangentes nestes pontos e os valores correspondentes são denominados de Z (eixo y) e t (eixo x). O ponto em que a reta tangente toca no eixo y é onde obtém-se o valor de Z_i , conforme mostrado na Figura 3.

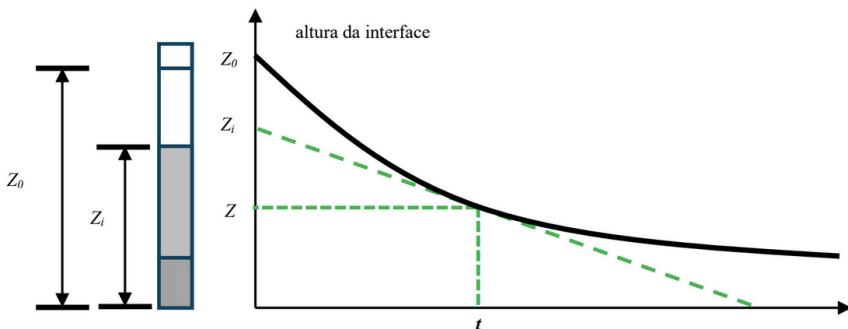


Figura 3. Determinação da altura da interface.

A obtenção dos pontos correspondentes às retas tangentes deve ser realizada para comparação de resultados. A partir da aplicação da equação 2, a concentração da suspensão na zona limite (C), em g/mL, pode ser determinada com os valores da concentração inicial (C_0), em g/mL, altura inicial da suspensão (Z_0) em cm, e o valor de Z_i em cm.

$$C = \frac{C_0 \cdot Z_0}{Z_i} \quad (\text{Equação 2})$$

A velocidade com que a interface se move ao longo do tempo indica a taxa de sedimentação. Para determinar essa velocidade, aplica-se os valores de Z_i , Z e t , conforme a equação 3:

$$v = \frac{Z_i - Z}{t} \quad (\text{Equação 3})$$

Por fim, a equação 1 é aplicada para o dimensionamento do sedimentador, indicando qual deve ser a área da seção transversal adequada para que o equipamento opere de forma eficiente. Ao final da aplicação dos diferentes pontos obtidos no gráfico altura *versus* tempo, são obtidos valores correspondentes para a área do sedimentador. Com estes valores, seleciona-se o maior valor encontrado, uma vez que representa a condição mais crítica da operação de sedimentação.

4. ESTUDO DE CASO

Uma suspensão foi formulada na concentração de 0,30 g/mL de PCM e sua sedimentação foi estudada. Para isto, utilizou-se uma proveta de 50 mL. A faixa granulométrica do PCM utilizada foi de -170 + bandeja, correspondendo a um diâmetro médio de partículas de 0,044 mm. Os experimentos foram realizados em duplicita, e os dados estão mostrados na Tabela 1.

Experimento 1			Experimento 2		
Tempo (s)	Volume (mL)	Altura (cm)	Tempo (s)	Volume (mL)	Altura (cm)
0	50	11,1	0	50	11,1
13	48	10,6	52	43	9,5
28	46	10,2	75	40	8,8
41	44	9,7	86	38	8,4
54	42	9,3	100	36	8,0
107	26	5,7	115	34	7,5
134	32	7,1	134	32	7,1
172	28	6,2	152	30	6,6
188	26	5,7	170	28	6,2
207	24	5,3	182	26	5,7
235	22	4,9	215	24	5,3
269	20	4,4	243	22	4,9
289	19	4,2	275	20	4,4
440	16	3,5	323	18	4,0

Tabela 1. Dados experimentais de Sedimentação.

A plotagem dos dados da Tabela 1 gera a curva de sedimentação mostrada na Figura 4, onde estão traçadas as tangentes para obter os dados necessários para o cálculo da área do sedimentador.

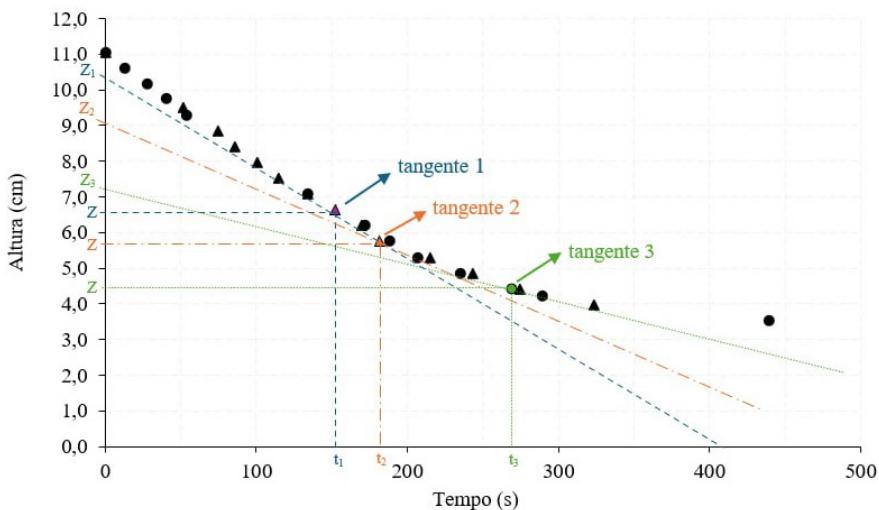


Figura 4. Tangentes da curva de sedimentação.

Após a finalização da sedimentação, é possível observar o volume da lama formada que corresponde a região de compactação do material particulado (Figura 5).



Figura 5. Região de compactação do PCM após a sedimentação.

A Tabela 2 mostra os valores de Z_i , Z e t das três tangentes traçadas na Figura 4, assim como os valores calculados da concentração da suspensão, da velocidade de sedimentação e da área do sedimentador, sabendo-se que $C_0 = 0,30 \text{ g/mL}$ e $Z_0 = 11,1 \text{ cm}$ e adotando-se uma vazão volumétrica de $500 \text{ cm}^3/\text{s}$. Da Figura 5, observa-se que o volume de lama formado foi de 14 mL .

Dados	Z_i (cm)	Z (cm)	t (s)	V (cm/s)	C_i (g/cm ³)	A (cm ²)
Tangente 1	10,4	6,6	152	0,025	0,320	13.142,5
Tangente 2	9,0	5,7	182	0,018	0,370	14.642,7
Tangente 3	7,2	4,4	269	0,010	0,463	17.717,3

Tabela 2. Dados experimentais da sedimentação e cálculo dos parâmetros associados.

Desta forma, baseado nos dados experimentais e para uma vazão volumétrica de $500 \text{ cm}^3/\text{s}$, a área mais adequada para o projeto do sedimentador é de **$17.717,3 \text{ cm}^2$** .

QUESTIONAMENTOS AOS LEITORES

- Quais métodos podem ser utilizados em laboratório para determinar a velocidade de sedimentação e a altura da interface sólido-líquido ao longo do tempo?

2. Por que o vinho ou o azeite de oliva pode apresentar borras ou resíduos no fundo da garrafa? A sedimentação está presente nesse processo?
3. Por que é importante evitar a agitação ou perturbação do sistema durante o processo de sedimentação em laboratório?
4. Como as estações de tratamento de água removem o lodo e as partículas sólidas da água bruta?

NOTÁVEIS CIENTISTAS EM OPERAÇÕES UNITÁRIAS

- George James Kynch (1915 – 1987)



(Kynch, 1952)

George Kynch foi um cientista e engenheiro britânico que se destacou por suas contribuições fundamentais à mecânica dos fluidos aplicada à sedimentação de partículas em suspensão. Seu trabalho mais famoso é o artigo clássico publicado em 1952, onde ele apresentou a Teoria da Sedimentação em Leito Espesso. A teoria de Kynch é usada até hoje para dimensionar decantadores industriais (por exemplo, em mineração, papel e celulose, e tratamento de efluentes); estimar a velocidade de interface entre zona clara e zona densa de partículas; entender e prever formação de lodo e compactação de sólidos no fundo de tanques; e analisar processos de separação sólido-líquido onde a interação entre partículas não pode ser ignorada. Sua contribuição permanece essencial no estudo de processos de separação e no dimensionamento de equipamentos amplamente utilizados na indústria química, de mineração e ambiental.

REFERÊNCIAS

CREMASCO, Marco Aurélio. Operações Unitárias em Sistema Particulados fluido mecânicos e outro trabalhos. 3^a ed. – São Paulo: Blucher, 2018. 424p.

FOUST, A. S., WENZEL, L. A., CLUMP, C. W., MAUS, L., ANDERSEN, L. B. Princípio das Operações Unitárias. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1982.

GOMIDE, R. Operações unitárias: Volume 1 – Operações com sistemas sólidos granulares. São Paulo: Edição do Autor, 1983.

KYNCH, G. J. A theory of sedimentation. *Transactions of the Faraday Society*, v. 48, p. 166, 1952.

MATOS, S. P. Operações Unitárias: fundamentos, transformações e aplicações dos fenômenos físicos e químicos. 1^a ed. - São Paulo, 2015.



C A P Í T U L O 3

REOLOGIA DE UM FLUIDO DE PERFURAÇÃO BASE

Fabiola Dias da Silva Curbelo

Iara Caroline Assunção Dorigon

João Pedro Gonçalves de Souza Soares

José Cavalcante de Queiroz Neto

Maria Eduarda Araújo Pessoa

Rafael Peixoto Alves

Ted Johnson Vasconcelos Leitão

1. INTRODUÇÃO

Reologia é o estudo da deformação e fluxo de matéria sob a influência de uma tensão aplicada. Para avaliar o comportamento reológico de um fluido, uma tensão controlada e bem definida é aplicada ao material durante um determinado tempo, e a deformação resultante é medida para dar uma indicação das propriedades reológicas do material. No estudo da reologia de fluidos, os parâmetros avaliados são viscosidade, resistência ao escoamento e grau de gelificação.

Em operações de perfuração, a reologia se refere à relação da tensão de cisalhamento com a taxa de cisalhamento do fluido de perfuração. Com isso, as propriedades reológicas obtidas são usadas para projetar a hidráulica do poço e avaliar o desempenho dos fluidos utilizados. Os fluidos de perfuração são essenciais para a segurança e a eficiência da perfuração de qualquer tipo de poço de petróleo.

Os fluidos são responsáveis por carregar e suspender o cascalho advindo da perfuração, resfriar a broca e a coluna de perfuração, limpar a interface entre a broca e a seção de perfuração e estabilizar a pressão de formação, que aumenta ao longo da profundidade do poço (Deshmukh; Dewangan, 2022). Os fluidos de perfuração podem ser classificados como sintéticos, aquosos ou não aquosos, sendo os aquosos os mais atrativos por apresentarem fácil preparação e baixo custo.

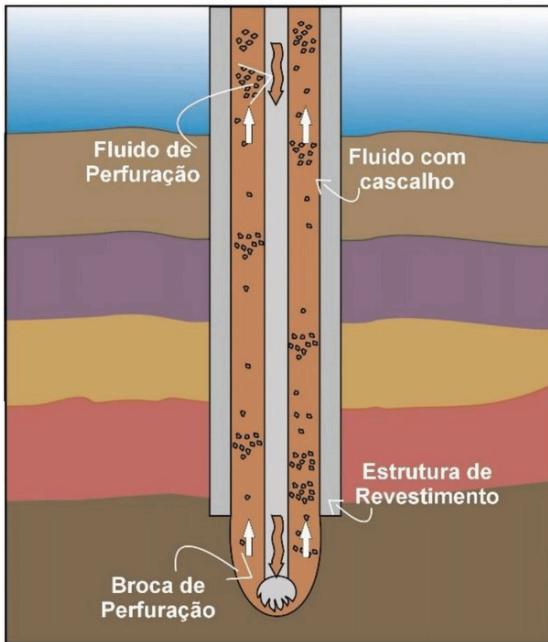


Figura 1. Esquema do fluido de perfuração na coluna.

Os modelos reológicos são ferramentas úteis para descrever, matematicamente, a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento de um determinado fluido (Gautam; Guria, 2020). Na ciência do escoamento de fluidos, eles podem ser classificados em fluidos Newtonianos e fluidos não-Newtonianos.

Fluidos Newtonianos são aqueles que seguem a Lei da Viscosidade de Newton (Equação 1) e, sendo assim, a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação é linear e a constante de proporcionalidade dessa relação é a viscosidade absoluta do fluido.

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que: τ é a tensão de cisalhamento (N/m^2); μ é a viscosidade absoluta ($Pa.s$) e $\frac{du}{dy}$ é a taxa de cisalhamento (s^{-1}).

Fluidos não-Newtonianos, também chamados de fluidos viscoelásticos, são fluidos cuja viscosidade não é constante. Com isso, para avaliar o comportamento deles, modelos matemáticos são necessários para determinar os parâmetros reológicos, como tensão de cisalhamento, índice de comportamento, índice de consistência, tensão inicial de escoamento, dentre outros parâmetros, que descrevem o comportamento geral do escoamento do fluido (Hong et al., 2018).

Alguns modelos matemáticos foram desenvolvidos para descrever a reologia dos fluidos não-Newtonianos. Esse desenvolvimento é importante para a indústria de perfuração de poços, pois a grande maioria dos fluidos utilizados se comportam como fluidos não-Newtonianos (Silva et al., 2022). A Figura 1 mostra os modelos reológicos mais comuns.

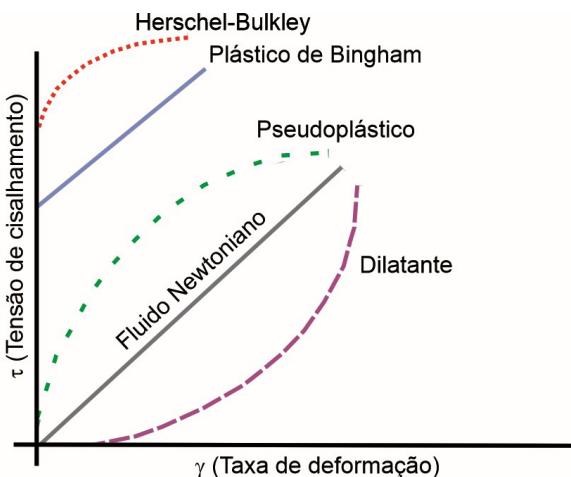


Figura 2. Curvas de fluxo dos modelos reológicos.

Os modelos reológicos mais comumente empregados para representar o comportamento dos fluidos não newtonianos são: Plástico de Bingham, 1922), Lei de Potência (Govier; Aziz, 1972; Skelland, 1967) e o Herschel–Bulkley (Herschel; Bulkley, 1926). Dentre eles, os modelos de Bingham e de Lei de Potência destacam-se pela simplicidade matemática e pela ampla aplicação prática. No entanto, ambos apresentam limitações na representação do comportamento reológico em toda a faixa de taxas de cisalhamento, especialmente em baixos valores.

O modelo de Herschel–Bulkley (Herschel; Bulkley, 1926) é representado por uma equação matemática de três parâmetros e, atualmente, é considerado o mais preciso na previsão do comportamento da grande maioria dos fluidos de perfuração, quando comparado aos modelos de dois parâmetros (Silva et al., 2022). Este modelo calcula, mais precisamente, o limite de escoamento e, também, caracteriza melhor o comportamento do fluido por toda a faixa de taxa de cisalhamento. As equações dos principais modelos descritivos do comportamento reológico dos fluidos de perfuração não-Newtonianos são mostradas na Tabela 1.

Modelo	Autor(es)	Equação	
Plástico de Bingham	(Bingham, 1922)	$\tau = \tau_0 + \mu_p \gamma$	Equação 2
Lei de Potência	(Govier; Aziz, 1972; Skelland, 1967)	$\tau = k\gamma^n$	Equação 3
Herschel-Bulkley	(Herschel; Bulkley, 1926)	$\tau = \tau_0 + k\gamma^n$	Equação 4

Tabela 1. Modelos reológicos mais utilizados para fluidos não-newtonianos.

Em que: τ é tensão de cisalhamento; τ_0 é tensão inicial de cisalhamento; μ_p é viscosidade plástica; γ é a taxa de deformação; k é o índice de consistência e n é o índice de comportamento.

Em condições operacionais, as propriedades reológicas mais relevantes para o desenvolvimento e controle de fluidos de perfuração incluem: viscosidade aparente, viscosidade plástica, limite de escoamento e força gel. O monitoramento dessas propriedades visa otimizar o desempenho hidráulico do fluido, minimizar a pressão requerida nas bombas, promover a limpeza eficiente do poço, reduzir a possibilidade de influxo de fluidos da formação e evitar perdas de circulação (Deshmukh; Dewangan, 2022).

De modo geral, os fluidos de perfuração são compostos de uma fase fluida contínua onde são dispersos os sólidos aditivos. A viscosidade plástica é a parte da resistência ao fluxo causada pela fricção mecânica da interação sólido/fluido no sistema. Tal fricção pode ser causada pela concentração, pelo tamanho e pela forma dos sólidos, assim como, pela viscosidade da fase fluida. O monitoramento da viscosidade plástica do permite avaliar a necessidade de controle da concentração de sólidos no fluido. Sendo assim, quanto maior o teor de sólidos ou quanto menor o diâmetro das partículas dispersas no sistema, mais alta será a viscosidade plástica do fluido.

A viscosidade aparente é definida como a viscosidade de um fluido não-Newtoniano em uma taxa de cisalhamento fixada, conforme estabelecido pelo American Petroleum Institute (API) (Al-Khdheeawi; Mahdi, 2019). Em outras palavras, a medida da viscosidade aparente representaria a viscosidade que o fluido teria caso seu comportamento fosse newtoniano, sob determinadas condições de fluxo.

O limite de escoamento representa a resistência inicial a ser superada para que o fluido escoe. Esta resistência é devida às forças eletrostáticas atrativas localizadas na superfície das partículas (Caenn; Darley; Gray, 2011). O limite de escoamento depende dos tipos de sólidos presentes e suas cargas de superfície, da concentração desses sólidos, e do tipo e da concentração de outros íons ou sais opcionalmente presentes. Esta propriedade é sensível ao ambiente eletroquímico, sendo um bom indicador da necessidade de um tratamento químico (Caenn; Darley; Gray, 2011). Assim como ocorre com a VP, a elevação da concentração de sólidos tende a aumentar o valor do limite de escoamento.

A força gel é a tensão de cisalhamento do fluido de perfuração medida em baixa taxa de cisalhamento, geralmente realizada com um viscosímetro após o fluido permanecer estático por um intervalo de tempo, de 10 s e 10 min, de acordo com o procedimento padrão da API. Os valores são usualmente expressos em $lbf/100ft^2$. Esta propriedade demonstra a capacidade do fluido de perfuração de suspender os cortes de perfuração (cascalho) quando em circulação.

2. OBJETIVOS

Os objetivos principais da prática “Reologia de um Fluido de Perfuração Base” são:

1. Avaliar as principais propriedades reológicas de interesse do fluido, com ênfase na determinação da viscosidade plástica, viscosidade aparente, limite de escoamento e força gel;
2. Construir a curva de fluxo do fluido e identificar o modelo reológico que melhor se ajusta aos dados experimentais obtidos;
3. Avaliar a influência dos aditivos no comportamento reológico do fluido, bem como as possíveis interações entre os materiais usados em sua formulação.

3. METODOLOGIA

A análise reológica dos fluidos de perfuração é conduzida conforme os procedimentos estabelecidos pela norma API 13B. Para a realização dos ensaios, é empregado o viscosímetro rotacional Fann 35A (Figura 3). Este equipamento fornece valores de leituras em graus de deflexão, com os quais é possível determinar a viscosidade aparente (VA), a viscosidade plástica (VP), o limite de escoamento (LE) e as forças géis inicial e final (G_0 e G_f , respectivamente).

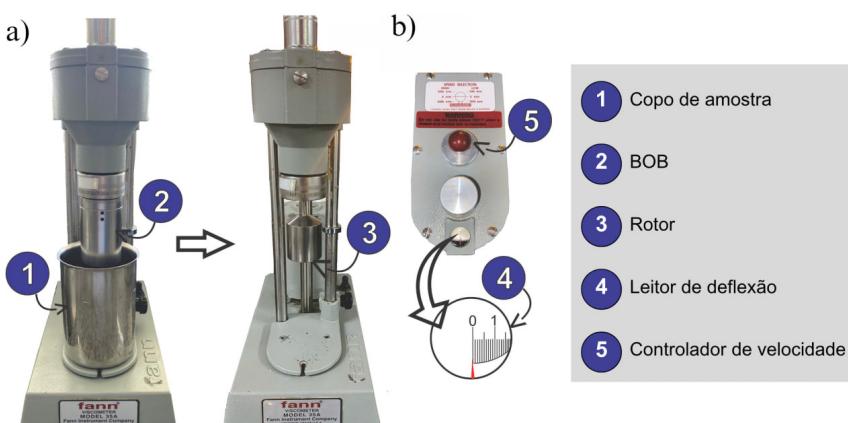


Figura 3. Viscosímetro Fann 35-A, (a) Visão frontal e (b) Visão superior.

De acordo com a Norma API 13B, as leituras devem ser efetuadas para as seguintes velocidades rotacionais: 600, 300, 200, 100, 6 e 3 rpm. As equações para determinação das propriedades reológicas do fluido estão apresentadas na Tabela 2.

Propriedade	Descrição	Unidades API	Unidades SI
Viscosidade aparente (VA)	$L_{600}/2$	cP	$1 \text{ cP} = 1 \text{ mPa.s}$
Viscosidade plástica (VP)	$L_{600} - L_{300}$	cP	
Gel inicial (G_0)	L_3 após 10 s	$\text{Lbf}/100 \text{ ft}^2$	
Gel final (G_f)	L_3 após 10 min	$\text{Lbf}/100 \text{ ft}^2$	$1 \text{ lbf}/100 \text{ ft}^2 = 0,48 \text{ Pa}$
Limite de escoamento (LE)	$L_{300} - PV$	$\text{Lbf}/100 \text{ ft}^2$	

Tabela 2. Propriedades reológicas e suas respectivas equações e unidades.

L_{600} : leitura do viscosímetro em 600 rpm; L_{300} : leitura do viscosímetro em 300 rpm; e L_3 : leitura do viscosímetro em 3 rpm.

Para determinar os pontos necessários para construir a curva de fluxo do fluido é necessário calcular a tensão de cisalhamento para cada taxa de deformação aplicada no fluido. A taxa de deformação é diretamente proporcional à velocidade de rotação do rotor do viscosímetro. A taxa de cisalhamento $\gamma (\text{s}^{-1})$ é calculada através da Equação 5.

$$\gamma = 1,703 \cdot N \quad (\text{Equação 5})$$

Em que: N é velocidade de rotação do rotor, em rpm.

A tensão de cisalhamento $\tau (\text{N/m}^2)$ é diretamente proporcional ao grau de deflexão obtido pela leitura do viscosímetro, sendo calculada de acordo com a Equação 6.

$$\tau = 0,51 \cdot \theta \quad (\text{Equação 6})$$

Em que: θ é a média das leituras de deflexão obtidas no viscosímetro, para cada taxa de cisalhamento aplicada.

Os valores de γ e τ são justamente os dados necessários para a construção da curva de fluxo do fluido. Além disso, através do ajuste dos modelos aos dados experimentais, é possível avaliar qual modelo melhor representa estes dados e, por consequência, avaliar como o fluido se comporta.

3. ESTUDO DE CASO

Um fluido de perfuração foi formulado em laboratório com a seguinte composição: 400 mL de água, 4 g de goma xantana e 40 g de pó de conchas de molusco (PCM) com diâmetro de partícula médio de 0,09 mm. A água é a fase líquida contínua onde serão dispersos os sólidos. A goma xantana atua nessa formulação como modificador de reologia do fluido, conferindo viscosidade ao sistema.

O PCM é um material adensante e obturante, utilizado em laboratório para substituir o CaCO₃, sendo aproveitado como uma alternativa para reutilização de um resíduo gerado em grandes quantidades (Curbelo et al., 2021). Posteriormente, esse fluido foi submetido a uma análise reológica no viscosímetro Fann 35A e os dados experimentais obtidos estão apresentados na Tabela 3.

Rotação, N (rpm)	Leitura das deflexões (θ)			Taxa de cisalhamento $\gamma = 1,703 * N \text{ (s}^{-1}\text{)}$	Tensão de cisalhamento $\tau = 0,51 * \theta \text{ (N/m}^2\text{)}$
	1 ^a leitura	2 ^a leitura	Média		
L_{600}	128	128	128,0	1021,8	65,28
L_{300}	99	101	100,0	510,9	51,00
L_{200}	88	89	88,5	340,6	45,14
L_{100}	74	76	75,0	170,3	38,25
L_6	46	47	46,5	10,218	23,72
L_3	40	42	41,0	5,109	20,91

Tabela 3. Dados experimentais obtidos no ensaio de reologia do fluido de perfuração.

Os valores de deflexão obtidos são consistentes, estando bem próximos nas duas leituras. Além disso, os valores obtidos na 2^a leitura são ligeiramente maiores quando comparados ao da 1^a leitura. Isso acontece, porque com o funcionamento contínuo do viscosímetro, a temperatura do sistema aumenta gradativamente e isso faz com que a tensão de cisalhamento aumente, devido ao cisalhamento sofrido pelo fluido. Com os valores obtidos experimentalmente, calcula-se os parâmetros reológicos do fluido de perfuração, que estão apresentados na Tabela 4.

VA (cP)	VP (cP)	LE ($\frac{lbf}{100ft^2}$)	G_0 ($\frac{lbf}{100ft^2}$)	G_f ($\frac{lbf}{100ft^2}$)
64,0	28,0	72,0	13,0	21,0

Tabela 4. Parâmetros reológicos obtidos para o fluido formulado.

O baixo valor de viscosidade plástica pode ser atribuído ao baixo teor de sólidos utilizado no fluido. O alto valor obtido de limite de escoamento implica que o fluido possui comportamento não-newtoniano e que, por isso, tem boa capacidade de carrear o cascalho oriundo da perfuração (Agwu; Okon; Udo, 2015).

Em seguida, os valores de tensão e taxa de cisalhamento foram utilizados para a construção da curva de fluxo do fluido (Figura 4). Os pontos experimentais já mostram o comportamento não-newtoniano do fluido, visto que a relação da tensão de cisalhamento com a taxa de cisalhamento não é linear. O fluido se comporta tipicamente com índice de comportamento (n) inferior a 1 e tensão inicial de escoamento (τ_0).

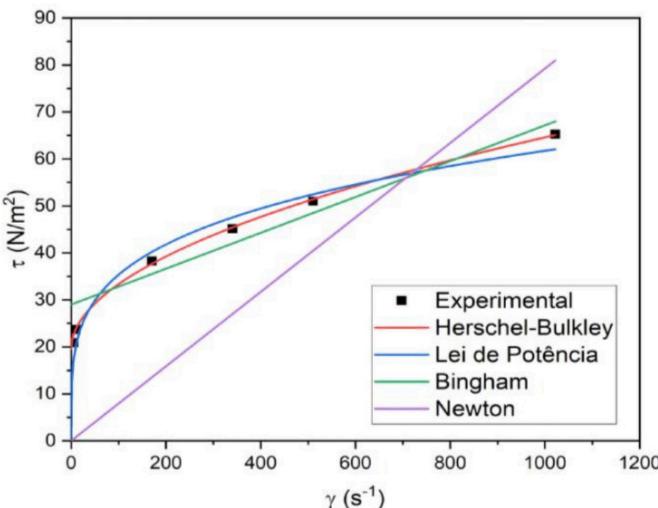


Figura 4. Curva de fluxo de tensão *versus* taxa de cisalhamento para o fluido aquoso estudado.

O ajuste dos dados experimentais foi feito para os modelos Newtoniano, Plástico de Bingham, Lei de Potência e Herschel-Bulkley. Pela curva de fluxo, observa-se que o modelo de Herschel-Bulkley foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais.

A curva de fluxo tem comportamento pseudoplástico, característica de fluidos com afinamento por cisalhamento, ou seja, que diminuem os parâmetros reológicos, como a viscosidade, com o aumento da taxa de deformação. A Tabela 5 apresenta os dados de R^2 associados ao ajuste de cada modelo reológico.

Dados de ajuste	Modelos reológicos			
	Newton	Bingham	Lei de Potência	Herschel-Bulkley
R^2	0,824	0,933	0,966	0,999

Tabela 5. Ajuste dos modelos reológicos aos dados experimentais.

O modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais foi o de Herschel-Bulkley, com tensão de escoamento inicial $\tau_0 = 18,07 \text{ N/m}^2$, índice de comportamento $n=0,49$ e índice de consistência $k = 1,60 \text{ Pa.s}^{0,49}$. A equação do modelo que representa o fluido é: $\tau = 18,07 + 1,60 \cdot (\gamma)^{0,49}$. Com isso, pode-se determinar a tensão de cisalhamento do modelo, a partir das taxas de cisalhamento aplicadas no viscosímetro.

O erro padrão associado ao modelo de Herschel-Bulkley está apresentado na Tabela 6. O erro médio do modelo comparado aos dados experimentais é de $0,267 \text{ N/m}^2$, confirmando que o modelo é capaz de predizer, de maneira fidedigna, o comportamento reológico do fluido formulado.

Taxa de deformação (s^{-1})	Tensão de cisalhamento (N/m^2)		
	Experimental	Herschel-Bulkley	Erro padrão
1021,8	65,280	64,969	0,156
510,9	51,000	51,520	0,260
340,6	45,135	45,521	0,193
170,3	38,250	37,649	0,300
10,218	23,715	23,038	0,339
5,109	20,910	21,614	0,352

Tabela 6. Erro padrão associado às medidas do modelo de Herschel-Bulkley.

Esses resultados confirmam que o fluido é não-Newtoniano, com comportamento pseudoplástico e ótima capacidade de carrear eficientemente o cascalho da perfuração, suspendendo-o e transportando-o para a superfície, além de manter a estabilidade do poço.

QUESTIONAMENTOS AOS LEITORES

1. De modo geral, por que os fluidos de perfuração apresentam comportamento não-newtoniano? Explique por que o comportamento não-newtoniano ajuda a melhorar a segurança e a eficiência nas operações de perfuração de poços.
2. O que explica o fato da pasta de dente escoar mais facilmente quando pressionamos a embalagem? A pasta se comporta como um fluido newtoniano ou não-newtoniano?
3. Por que o mel escorre lentamente da colher quando está em baixa temperatura, enquanto flui mais rapidamente quando está aquecido?
4. Por que o óleo e a água não se misturam facilmente, e como a adição de emulsificantes pode mudar a viscosidade?
5. Fluidos não-newtonianos podem apresentar comportamento viscoso semelhante ao de um sólido sob certas condições? Em caso afirmativo, cite um exemplo cotidiano que ilustre esse fenômeno.

NOTÁVEIS CIENTISTAS EM OPERAÇÕES UNITÁRIAS

- Eugene Cook Bingham (1878 – 1945)



Fonte: (Bingham, 1922)

Eugene Cook Bingham é, frequentemente, considerado um dos pais da reologia. Seu primeiro trabalho sobre viscosidade e fluidez foi publicado em 1906. Bingham desenvolveu um modelo de reologia que representa fluidos cuja particularidade é fluir como fluido quando lhes é aplicada uma tensão de cisalhamento maior que um valor mínimo e manter um comportamento sólido abaixo desse valor. Produtos de uso diário, como pasta de dente, apresentam essas características. Além disso, Bingham foi um dos fundadores da *Society of Rheology*, uma organização profissional dedicada ao estudo do comportamento dos materiais sob fluxo e deformação, que existe até hoje. Em resumo, Eugene Bingham foi um cientista fundamental na história da engenharia química e no progresso da ciência para o desenvolvimento das operações unitárias.

REFERÊNCIAS

AGWU, O. E.; OKON, A. N.; UDOH, F. D. A Comparative Study of Diesel Oil and Soybean Oil as Oil-Based Drilling Mud. *Journal of Petroleum Engineering*, v. 2015, p. 1–10, 11 fev. 2015.

AL-KHDHEEAWI, E. A.; MAHDI, D. S. Apparent Viscosity Prediction of Water-Based Muds Using Empirical Correlation and an Artificial Neural Network. *Energies*, v. 12, n. 16, p. 3067, 9 ago. 2019.

BINGHAM, E. C. *Fluidity and Plasticity*. 1. ed. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1922. v. 1.

CAENN, R.; DARLEY, H. C. H.; GRAY, G. R. Introduction to Drilling Fluids. In: Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids. New York: Elsevier, 2011. p. 1–37.

CURBELO, F. D. S. et al. Rejeito de conchas de mariscos como agente obturante em fluidos de perfuração microemulsionados. Universidade Federal da Paraíba (UFPB). BR1020210253568. Brasil, 2021.

DESHMUKH, V.; DEWANGAN, S. K. Review on various borehole cleaning parameters related to oil and gas well drilling. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 44, n. 5, p. 185, 13 maio 2022.

GAUTAM, S.; GURIA, C. Optimal Synthesis, Characterization, and Performance Evaluation of High-Pressure High-Temperature Polymer-Based Drilling Fluid: The Effect of Viscoelasticity on Cutting Transport, Filtration Loss, and Lubricity. *SPE Journal*, v. 25, n. 03, p. 1333–1350, 11 jun. 2020.

GOVIER, G. W.; AZIZ, K. The Flow of Complex Mixtures in Pipes. 1. ed. New York: Krieger Publishing Company, 1972. v. 1.

HERSCHEL, W. H.; BULKLEY, R. Konsistenzmessungen von Gummi-Benzollösungen. *Kolloid-Zeitschrift*, v. 39, n. 4, p. 291–300, ago. 1926.

HONG, E. et al. A comprehensive review on rheological studies of sludge from various sections of municipal wastewater treatment plants for enhancement of process performance. *Advances in Colloid and Interface Science*, v. 257, p. 19–30, jul. 2018.

SILVA, R. R. et al. Evaluation of novel microemulsion-based (O/W) drilling fluid with nonionic surfactant and shale interaction mechanisms. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 213, p. 110327, jun. 2022.

SKELLAND, A. H. P. Non-Newtonian Flow and Heat Transfer. 1. ed. New York: Wiley, 1967. v. 1.



CAPÍTULO 4

FILTRAÇÃO DE UM FLUIDO DE PERFURAÇÃO BASE

Fabiola Dias da Silva Curbelo

Iara Caroline Assunção Dorigon

João Pedro Gonçalves de Souza Soares

Luana Leite Ramos

Maria Eduarda Araújo Pessoa

Rafael Peixoto Alves

Ted Johnson Vasconcelos Leitão

1. INTRODUÇÃO

A operação unitária de Filtração é um processo mecânico usado para separar sólidos de líquidos ou gases, interpondo um meio poroso através do qual somente o fluido pode passar (Enamala et al., 2018). Ao longo dos anos, muitas tecnologias foram desenvolvidas e, atualmente, o processo de filtração pode ser categorizado em diferentes tipos, incluindo: magnética, pressão, membrana, fluxo tangencial, vácuo e fluxo cruzado. Esse desenvolvimento tecnológico possibilitou a utilização do processo de filtração nos mais diversos setores da indústria química.

No processo convencional de filtração, os sólidos são retidos pelo meio filtrante e o filtrado é obtido, que é uma solução límpida sem partículas sólidas. As partículas sólidas depositadas no filtro formam uma camada, que é conhecida como torta de filtração (Najafpour, 2007). O processo de formação da torta de filtração em uma operação de perfuração é apresentado na Figura 1. Estes sólidos depositados no meio filtrante criam uma resistência que reduz o fluxo do fluido através do filtro. A espessura da torta de filtração aumenta gradualmente à medida que mais sólidos são retidos (Fellows, 2009).

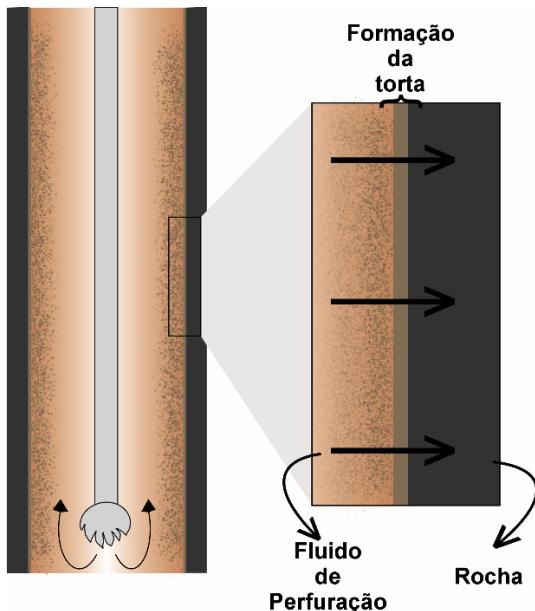


Figura 1. Processo de formação da torta de filtração na perfuração de poços.

Nas etapas de perfuração de poços de petróleo, a coluna de perfuração sempre opera com uma pressão mínima igual ou superior a pressão da formação (Ali; Ahmad; Ganat, 2022). Sendo a formação rochosa permeável, essa diferença de pressão faz com que o fluido penetre na formação.

Nesse processo, frações da fase líquida do fluido de perfuração são perdidas para a formação adjacente, enquanto partículas sólidas menores que os poros, que estavam em suspensão no fluido, também tendem a invadir e tamponar as gargantas de poro, reduzindo a permeabilidade ao óleo e ao gás, danificando a região ao redor do poço (Islam; Hossain, 2021). As partículas maiores se acumulam na parede do poço, iniciando a formação da torta de filtração, que na perfuração de poços, é chamada de reboco.

Os fluidos devem ser formulados para obstruir o mais rápido possível as formações permeáveis. A formação do reboco é vital ao perfurar uma formação permeável para reduzir a perda de fluido e, de alguma forma, proteger a formação e conferir estabilidade ao poço (Tabatabaei et al., 2022). Para isso, o reboco formado deve ser fino e de baixa permeabilidade, para que a operação de perfuração seja bem-sucedida. Além disso, o reboco deve ser de fácil remoção, levando em consideração as etapas que se seguem após a perfuração, como a perfilagem e a cimentação do poço (Mohamed; Elkhatatny; Al-Majed, 2020). Assim, para avaliar as propriedades

de filtração do fluido de perfuração, o volume de filtrado e a espessura do reboco são dois parâmetros fundamentais, que são medidos rotineiramente para definir o comportamento do fluido quanto à filtração (Thomas, 2004).

Em laboratório, as propriedades de filtração dos fluidos de perfuração devem ser avaliadas e monitoradas por testes recomendados pelas normas API (*American Institute of Petroleum*), especificamente a Norma 13-B, que é referente às práticas laboratoriais recomendadas para fluidos aquosos (Al-Khdheeawi; Mahdi, 2019). São testes em regime estático, realizados usando um filtro prensa padronizado, que representam a taxa na qual formações permeáveis são seladas pela deposição do reboco após serem penetradas pela broca de perfuração. Essas medições podem ser feitas em diferentes condições de pressão e temperatura, de acordo com o equipamento utilizado. Para o padrão de teste de filtração estática nas normas API, utiliza-se uma pressão de 100 psi e temperatura de 28 °C, por 30 min.

O processo de filtração é regido pela Lei de Darcy (Foust, 1980), que estabelece a Equação Geral da Filtração (Equação 1). Para determinar as constantes a (Resistência da Torta) e R_m , (Resistência do meio filtrante) é feito um ajuste linear da Equação 1, através do gráfico t/V versus V . Dessa forma, os parâmetros a e R_m são obtidos experimentalmente.

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu a C}{2A^2 \Delta P} V + \frac{\mu}{A \Delta P} R_m \quad (\text{Equação 1})$$

Em que: t é o tempo de filtração (s); V é o volume de filtrado (mL); μ é a viscosidade do fluido (cP); a é a resistência da torta (cm/g), C é a concentração de sólidos na suspensão (g/mL), A é a área de filtração (cm²), ΔP é a pressão aplicada (Pa) e R_m é a resistência do meio filtrante (cm⁻¹).

As equações obtidas da linearização da Equação 1, $y = ax + b$, são representadas pelas Equações 2 e 3.

$$b = \frac{\mu R_m}{A \Delta P} \quad (\text{Equação 2})$$

$$a = \frac{\mu a C}{2A^2 \Delta P} \quad (\text{Equação 3})$$

Em que: a é o coeficiente angular da equação de linearização (s/cm⁶), b é o coeficiente linear da equação de linearização (s/cm³), .

2. OBJETIVOS

Os objetivos principais da prática “Filtração de um Fluido de Perfuração Base” são:

1. Realizar o ensaio de filtração por 30 min e avaliar o comportamento do filtrado ao longo do tempo;
2. Medir a espessura da torta formada e analisar a deposição dos sedimentos no meio filtrante;
3. Calcular a permeabilidade do reboco, utilizando a Equação de Darcy.

3. METODOLOGIA

Para este experimento, um fluido de perfuração base água foi formulado em laboratório com a composição apresentada na Tabela 1.

Componente	Quantidade
Água	400 mL
Goma xantana	4,0 g
Pó de concha do molusco (PCM) (-80+bandeja)	40,0 g

Tabela 1. Composição do fluido de perfuração.

O ensaio de volume de filtrado, realizado para estimar a quantidade líquida do fluido que passa para as formações adjacentes, é determinado em Filtro Prensa API pressurizado (Figura 2), de acordo com a norma API 13-B.



Figura 2. Filtro Prensa API pressurizado.

Cerca de 300 mL do fluido, previamente agitados, é submetido a uma pressão de 100 psi, com ar comprimido à temperatura de 28 °C, por 30 min. O experimento inicia com a montagem adequada da célula de filtração, de acordo com o procedimento ilustrado na Figura 2.

A montagem da célula de filtração inicia-se na base do filtro (6), seguida pela adição da tela de filtração (5), do papel de filtro (4) e do anel de vedação (3). Na sequência, o corpo da célula (2) é adicionado e vedado manualmente. Então, o fluido de perfuração é adicionado no corpo da célula e, finalmente, a célula de filtração é vedada com a parte superior (1), que possui o sistema de pressurização conectado ao compressor.

Em seguida, a célula fechada é acondicionada no filtro e presa pelo suporte de filtração. Neste instante, uma proveta graduada (7) deve ser posicionada na parte inferior do suporte de filtração e, em seguida, inicia-se o processo de filtração através da abertura da válvula que conecta o compressor à célula de filtração. Quando o sistema é pressurizado, deve-se acionar o cronômetro e registrar os pares experimentais de volume (m^3) versus tempo (s), até completar 30 min de ensaio de filtração. Terminado o ensaio, é verificada a quantidade de fluido total na proveta, que indica o volume de filtrado do fluido.

Ao final dos 30 min de ensaio, a válvula do sistema de pressurização da célula deve ser fechada e, com o sistema despressurizado, deve-se remover a célula do suporte. Desmontar a célula de filtração e remove-se cuidadosamente o papel de filtro contendo a torta de filtração, para posterior medição da espessura desta, de acordo com a Figura 3.

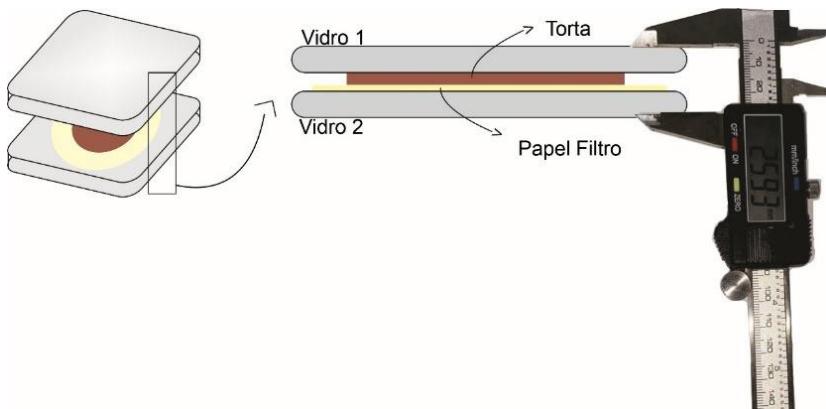


Figura 3. Procedimento de determinação de espessura da torta de filtração.

A metodologia de medição da espessura da torta inclui inserir o papel de filtro contendo a torta de filtração entre duas placas de vidro de espessura conhecidas. São realizadas oito medições com um paquímetro, sendo duas medidas realizadas em cada lado da placa (SILVA et al., 2022). Calcula-se, então, a média de cada lado e, em seguida, os valores são subtraídos da espessura total das duas placas. Dessa forma, é possível determinar a espessura média da torta de filtração.

A viscosidade do filtrado é, posteriormente, medida em um reômetro Brookfield DV-III Ultra (Figura 4), em que são realizadas 30 leituras de 1 a 100 rpm na temperatura de 30 °C.



Figura 4. Reômetro Brookfield DV-III Ultra.

Para calcular a permeabilidade da torta, utiliza-se a Lei de Darcy para o fluxo axial, nas condições de 100 psi e 30 min. Nestas condições, a Equação 1 se reduz a expressão representada pela Equação 4.

$$k = Q_f * \varepsilon * \mu * 8.95 * 10^{-5} \quad (\text{Equação 4})$$

Em que: k a permeabilidade do reboco (mD), Q_f o volume de filtrado (cm^3), ε a espessura do reboco formado (mm) e μ a viscosidade do filtrado (cP).

4. ESTUDO DE CASO

Os dados do ensaio de filtração estão apresentados na Tabela 2 e os gráficos de volume *versus* tempo e da linearização t/V *versus* V na Figura 5, com os quais obtém-se uma reta de modo que, através do coeficiente linear e do coeficiente angular da reta, é possível obter o valor de R_m e a , respectivamente.

Tempo (s)	Volume (mL)	t/V (s/mL)	Tempo (s)	Volume (mL)	t/V (s/mL)
81	0,6	135,0	744	5,2	143,1
118	1,0	118,0	792	5,4	146,7
156	1,2	130,0	836	5,6	149,3
185	1,6	115,6	880	5,8	151,7
205	1,8	113,9	920	6,0	153,3
227	2,0	113,5	973	6,2	156,9
251	2,2	114,1	1022	6,4	159,7
280	2,4	116,7	1077	6,6	163,2
313	2,6	120,4	1128	6,8	165,9
340	2,8	121,4	1170	7,0	167,1
365	3,0	121,7	1217	7,2	169,0
399	3,2	124,7	1293	7,4	174,7
430	3,4	126,5	1353	7,6	178,0
464	3,6	128,9	1413	7,8	181,2
490	3,8	128,9	1472	8,0	184,0
522	4,0	130,5	1520	8,2	185,4
559	4,2	133,1	1573	8,4	187,3
603	4,4	137,0	1643	8,6	191,0
640	4,6	139,1	1704	8,8	193,6
672	4,8	140,0	1777	9,0	197,4
709	5,0	141,8	1841	9,2	200,1

Tabela 2. Dados experimentais da curva de filtração.

A Figura 5 (a) mostra a curva de filtração, Volume filtrado *versus* tempo, usada para observar a velocidade de filtração ao longo do tempo, e a Figura 5 (b) mostra o ajuste linear para calcular a resistência da torta e a resistência do meio filtrante.

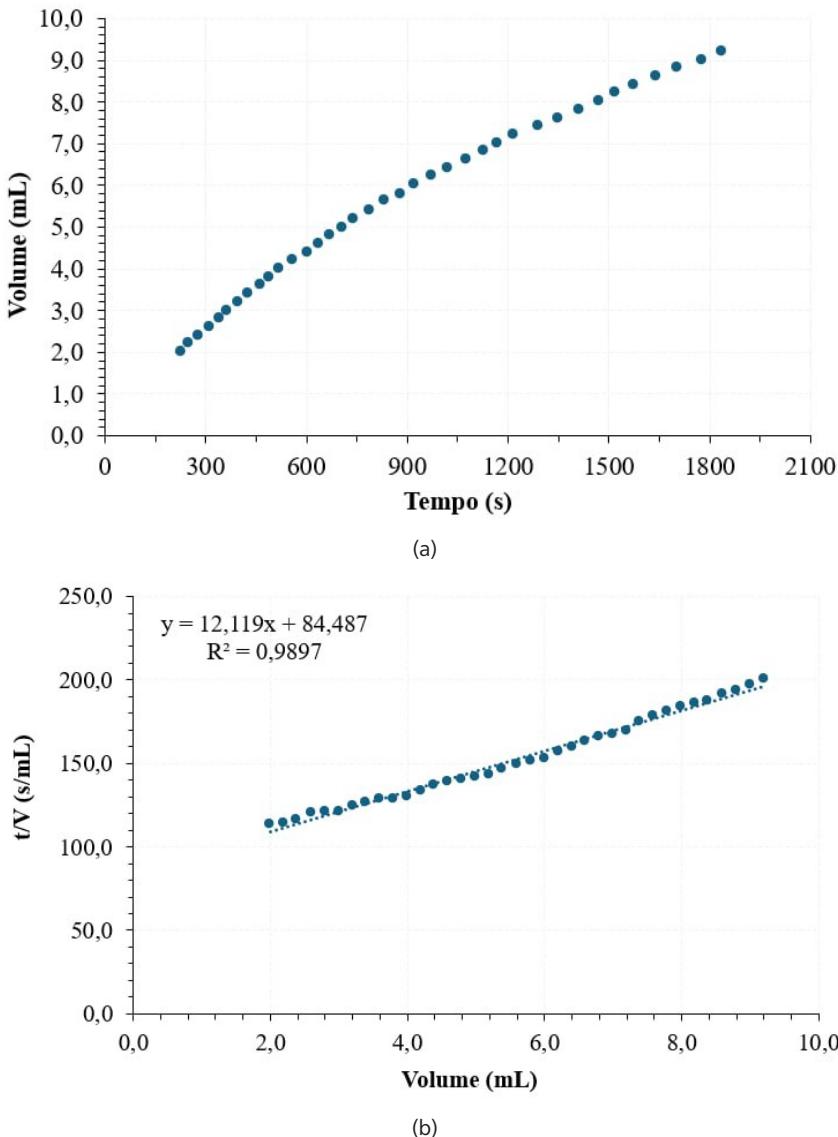


Figura 5. Curva de filtração (a) e ajuste linear (b).

Neste experimento, o volume de filtrado ao final do experimento foi de 9,2 mL. A equação da reta obtida ($y = 12,119 x + 84,487$) permite calcular os valores de resistência da torta (α) e do meio filtrante (R_m). As equações 2 e 3 ficam ajustadas de maneira que:

$$b = 84,487 = \frac{\mu R_m}{A \Delta P} \quad (\text{Equação 5})$$

$$a = tg(\beta) = \frac{\Delta y}{\Delta x} = 12,119 = \frac{\mu \alpha C}{2A^2 \Delta P} \quad (\text{Equação 6})$$

Para determinar os valores de α e R_m , é necessário obter, previamente, os valores de C e μ , uma vez que A ($63,62 \text{ cm}^2$) e ΔP (100 psi) já são valores conhecidos. O valor de μ representa a viscosidade do filtrado e é determinado no reômetro apresentado na Figura 4. Neste experimento, o valor da viscosidade foi de $0,00047 \text{ Pa.s}$. O valor de C é determinado pela Equação 7.

$$C = sp \quad (\text{Equação 7})$$

Em que: s é a fração em massa de sólidos na suspensão (adimensional) e ρ é a massa específica do fluido (g/mL).

Com os dados da Tabela 1, pode-se calcular o valor de s que foi $0,11$. A massa específica do fluido foi, previamente, determinada pela balança de lama Fann, obtendo-se o valor de $1,07 \text{ g/cm}^3$. Com isso, pode-se calcular o valor de C pela Equação 7 que foi de $0,1177 \text{ g/cm}^3$.

Com os valores de α e R_m , $1,44 \cdot 10^{-1} \text{ cm/g}$ e $7,88 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-1}$, respectivamente, é possível escrever a Equação Geral da Filtração para o experimento realizado, representada pela Equação 8.

$$\frac{t}{V} = \frac{3,38 \cdot 10^{-6} \left(\frac{\text{Pa.s}}{\text{cm}^2} \right)}{A^2 \Delta P} V + \frac{3,71 \cdot 10^1 \left(\frac{\text{Pa.s}}{\text{cm}} \right)}{A \Delta P} \quad (\text{Equação 8})$$

Através da Equação 8, pode-se fazer o *scale-up* do filtro. Por fim, a espessura da torta de filtração foi medida de acordo com a metodologia proposta, para determinação da permeabilidade da torta de filtro. A torta formada, após o processo de filtração, é mostrada na Figura 6.



(a) Visão lateral

(b) Visão frontal

Figura 6. Torta de filtração obtida no experimento (a) Visão lateral e (b) Visão frontal.

Os resultados da espessura da torta estão apresentados na Tabela 3.

Lado	Vidro I (mm)	Vidro II (mm)	Medidas da torta + vidro (mm)	Espessura da torta (ϵ) (mm)
A	4,05	4,55	10,33	1,73
B	4,09	4,57	11,56	2,9
C	4,09	4,62	11,90	3,19
D	4,05	4,57	10,73	2,11
			Média	2,48

Tabela 3. Medidas de espessura da torta de filtração formada.

Com o valor da espessura média da torta de filtração de 2,48 mm, determina-se a permeabilidade do reboco, através da Equação 4. Nesse caso, a permeabilidade da torta formada é de $k = 9,6 \cdot 10^{-4}$ mD.

QUESTIONAMENTOS AOS LEITORES

1. De modo geral, por que a filtração é considerada uma operação unitária essencial no desenvolvimento de fluidos de perfuração?
2. Quais são os parâmetros de filtração determinados em laboratório e por que eles são essenciais no dia a dia de uma operação de perfuração de poço?
3. Pensando nos processos de filtração que estão presentes no cotidiano, quando se filtra café em papel de filtro, no início da filtração o processo ocorre mais rapidamente e vai se prolongando com o passar do tempo. Explique por que isso acontece.

NOTÁVEIS CIENTISTAS EM OPERAÇÕES UNITÁRIAS

- Henry Philibert Gaspard Darcy (1803 – 1858)



Fonte: (BROWN, 2002).

Henry Philibert Gaspard Darcy foi um engenheiro francês cuja contribuição mais notável para a ciência e engenharia foi a formulação da Lei de Darcy, um princípio fundamental no estudo do escoamento de fluidos através de meios porosos. Sua importância científica é particularmente destacada nas operações unitárias da engenharia química e sanitária, especialmente no processo de filtração. A Lei de Darcy é a base para o projeto e análise de sistemas de filtração em meios porosos, como filtros de areia, carvão ativado, membranas e leitos filtrantes, sendo aplicada tanto em processos de filtração de água potável, tratamento de efluentes, quanto em operações industriais que envolvem separação sólido-líquido. Henry Darcy foi um pioneiro cuja formulação empírica simples revolucionou a compreensão dos processos de escoamento em meios porosos. Sua contribuição é fundamental para a engenharia moderna, especialmente nas operações unitárias como a filtração, tornando seu trabalho um marco na ciência aplicada à resolução de problemas práticos.

REFERÊNCIAS

- ALI, Imtiaz; AHMAD, Maqsood; GANAT, Tarek. Biopolymeric formulations for filtrate control applications in water-based drilling muds: A review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 210, p. 110021, mar. 2022.
- AL-KHDHEEAWI, Emad A.; MAHDI, Doaa Saleh. Apparent Viscosity Prediction of Water-Based Muds Using Empirical Correlation and an Artificial Neural Network. *Energies*, v. 12, n. 16, p. 3067, 9 ago. 2019.
- BROWN, G. O. Henry Darcy and the making of a law. *Water Resources Research*, v. 38, n. 7, 17 jul. 2002.
- ENAMALA, Manoj Kumar et al. Production of biofuels from microalgae - A review on cultivation, harvesting, lipid extraction, and numerous applications of microalgae. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 94, p. 49–68, out. 2018.
- FELLOWS, P. J. Separation and concentration of food components. In: *Food Processing Technology*. Elsevier, 2009. p. 188–228.
- FOUST, A. S. et al. *Principles of Unit Operations*. 2. ed. New Jersey, USA: Wiley, 1980. v. 1
- ISLAM, M. Rafiqul; HOSSAIN, M. Enamul. Environmental sustainability. In: *Drilling Engineering*. Amsterdam, NLD: Elsevier, 2021. p. 619–673.
- MOHAMED, Abdelmjeed; ELKATATNY, Salaheldin; AL-MAJED, Abdulaziz. Removal of Calcium

Carbonate Water-Based Filter Cake Using a Green Biodegradable Acid. *Sustainability*, v. 12, n. 3, p. 994, 30 jan. 2020.

NAJAFPOUR, Ghasem D. Downstream Processing. In: Biochemical Engineering and Biotechnology. Elsevier, 2007. p. 170–198.

SILVA, Raphael R. et al. Evaluation of novel microemulsion-based (O/W) drilling fluid with nonionic surfactant and shale interaction mechanisms. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 213, p. 110327, jun. 2022.

TABATABAEI, Majid et al. Sustainability in natural gas reservoir drilling: A review on environmentally and economically friendly fluids and optimal waste management. In: Sustainable Natural Gas Reservoir and Production Engineering. Amsterdam, NLD: Elsevier, 2022. p. 269–304.

THOMAS, Jose Eduardo. Fundamentos de Engenharia de Petróleo. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciênciam, 2004. v. 1.

TABELA DE CONVERSÃO DE UNIDADES

Comprimento	1 km = 1000 m 1 m = 100 cm 1 cm = 10^{-2} m 1 mm = 10^{-3} m 1 micrón (μ) = 10^{-6} m 1 milimicrón (m μ) = 10^{-9} m 1 angstrom (\AA) = 10^{-10} m	1 polegada (in) = 2,54 cm 1 pé (ft) = 30,48 cm 1 pé (ft) = 12 in 1 milha (mi) = 1,609 km 1 cm = 0,3937 in 1 m = 39,37 in 1 km = 0,6214 milha
Área	1 m ² = 10,76 ft ²	1 ft ² = 929 cm ²
Volume	1 l = 1000 cm ³ = 61,02 in ³ = 0,03532 ft ³ 1 m ³ = 1000 l = 35,32 ft ³ 1 ft ³ = 7,481 galão US = 0,02832 m ³ = 28,32 l 1 galão US = 231 in ³ = 3,785 l 1 galão British = 1,201 galão US = 277,4 in ³	
Massa	1 kg = 2,2046 lb _m = 0,06852 slug 1 lb _m = 453,6 g = 0,03108 slug 1 slug = 32,174 lb _m = 14,59 kg	
Velocidade	1 km/h = 0,2778 m/s = 0,6214 mi/h = 0,9113 ft/s 1 mi/h = 1,467 ft/s = 1,609 km/h = 0,4470 m/s	
Massa específica	1 g/cm ³ = 10 ³ kg/m ³ = 62,43 lb _m /ft ³ = 1,940 slug/ft ³ 1 lb _m /ft ³ = 0,01602 g/cm ³ 1 slug/ft ³ = 0,5154 g/cm ³	
Força	1 N = 10 ⁵ dinas = 0,1020 kgf = 0,2248 lbf 1 lbf = 4,448 N = 0,4536 kgf = 32,17 pdl (poundals) 1 kgf = 2,205 lbf = 9,807 N 1 ton. força = 1000 kgf = 2205 lbf 1 ton. força (US) = 907,2 kgf = 2000 lbf 1 ton. força (UK) = 1016 kgf = 2240 lbf	

TABELA DE CONVERSÃO DE UNIDADES

Energia	$1 \text{ J} = 1 \text{ N.m} = 10^7 \text{ ergs} = 0,7376 \text{ ft.lbf} = 0,2389 \text{ cal} = 9,481 \cdot 10^{-4} \text{ BTU}$ $1 \text{ ft.lbf} = 1,356 \text{ J} = 0,3239 \text{ cal} = 1,285 \cdot 10^{-3} \text{ BTU}$ $1 \text{ cal} = 4,186 \text{ J} = 3,087 \text{ ft.lbf} = 3,968 \cdot 10^{-3} \text{ BTU}$ $1 \text{ BTU} = 778 \text{ ft.lbf} = 1055 \text{ J} = 0,293 \text{ watt.h}$ $1 \text{ kw.h} = 3,60 \cdot 10^6 \text{ J} = 860,0 \text{ kcal} = 3413 \text{ BTU}$ $1 \text{ ev (elétron volt)} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
Potência	$1 \text{ watt} = 1 \text{ J/s} = 10^7 \text{ ergs/s} = 0,2389 \text{ cal/s}$ $1 \text{ HP (horsepower)} = 550 \text{ ft.lbf/s} = 33013 \text{ ft.lbf/min} = 746 \text{ watts}$ $1 \text{ kw} = 1,341 \text{ HP} = 737,6 \text{ ft.lbf/s} = 0,9478 \text{ BTU/s}$
Pressão	$1 \text{ N/m}^2 = 10 \text{ dinas/cm}^2 = 9,869 \cdot 10^{-6} \text{ atm} = 2,089 \cdot 10^{-2} \text{ lbf/ft}^2 = 1,45 \cdot 10^{-4} \text{ lbf/in}^2$ $1 \text{ lbf/in}^2 = 6895 \text{ N/m}^2 = 5,171 \text{ cmHg} = 27,68 \text{ in H}_2\text{O}$ $1 \text{ atm} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2 = 14,7 \text{ lbf/in}^2 = 76 \text{ cmHg} = 406,8 \text{ inH}_2\text{O}$ $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 10^{-5} \text{ atm}$ $1 \text{ Bar} = 0,987 \text{ atm} = 14,5 \text{ psia} = 10^5 \text{ N/m}^2$
Viscosidade	$1 \text{ cP} = 10^{-3} \text{ Pa.s}$
Constante dos gases	$R = 0,082 \text{ atm . L/ mol.K}$

TABELA DA SÉRIE DE PENEIRAS TYLER

Série completa com intervalo de $2^{\frac{1}{4}}$.

Número de malhas	Abertura (mm)	Abertura (in)
2 ½	7,925	0,3120
3	6,680	0,2630
3 ½	5,613	0,2210
4	4,699	0,1850
5	3,962	0,1560
6	3,327	0,1310
7	2,794	0,1100
8	2,362	0,0930
9	1,981	0,0780
10	1,651	0,0650
12	1,397	0,0550
14	1,168	0,0460
16	0,991	0,0390
20	0,833	0,0328
24	0,701	0,0276
28	0,589	0,0232
32	0,495	0,0195
35	0,417	0,0164
42	0,351	0,0138
48	0,295	0,0116
60	0,248	0,0098
65	0,208	0,0082
80	0,175	0,0069
100	0,147	0,0058
115	0,124	0,0049
150	0,104	0,0041
170	0,088	0,0035
200	0,074	0,0029
230	0,061	0,0024
270	0,053	0,0021
325	0,043	0,0017
400	0,038	0,0015



OPERAÇÕES UNITÁRIAS NA ENGENHARIA QUÍMICA

UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL

- 🌐 www.atenaeditora.com.br
 - ✉️ contato@atenaeditora.com.br
 - 📷 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
 - ⬇️ www.facebook.com/atenaeditora.com.br

 Atena
Editora
Ano 2025



OPERAÇÕES UNITÁRIAS NA ENGENHARIA QUÍMICA

UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL

- 🌐 www.atenaeditora.com.br
- ✉️ contato@atenaeditora.com.br
- ⌚ [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
- FACEBOOK www.facebook.com/atenaeditora.com.br

 **Atena**
Editora
Ano 2025

