



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).

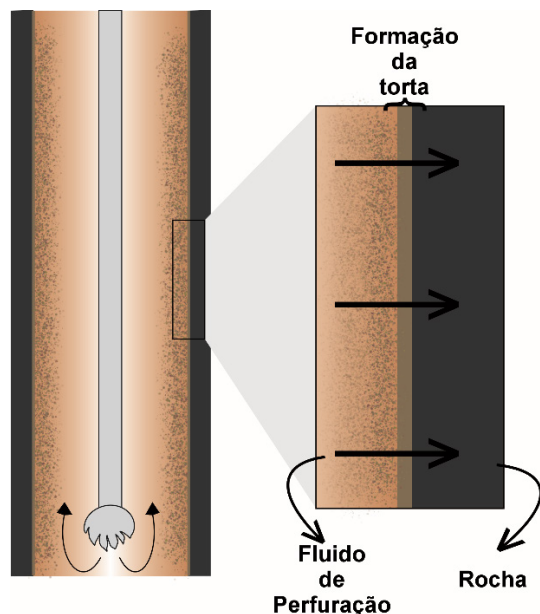


Figura 1. Processo de formação da torta de filtração na perfuração de poços.

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; Elkatatny; 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-Khdheawi; 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 α (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 α e R_m são obtidos experimentalmente.

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

Em que: t é o tempo de filtração (s); v é o volume de filtrado (mL); μ é a viscosidade do fluido (cP); α 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.

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

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

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.

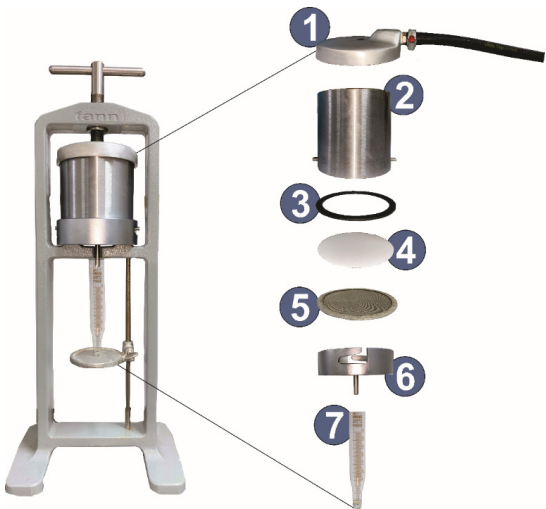


Figura 2. Filtro Prensa API pressurizado.

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.

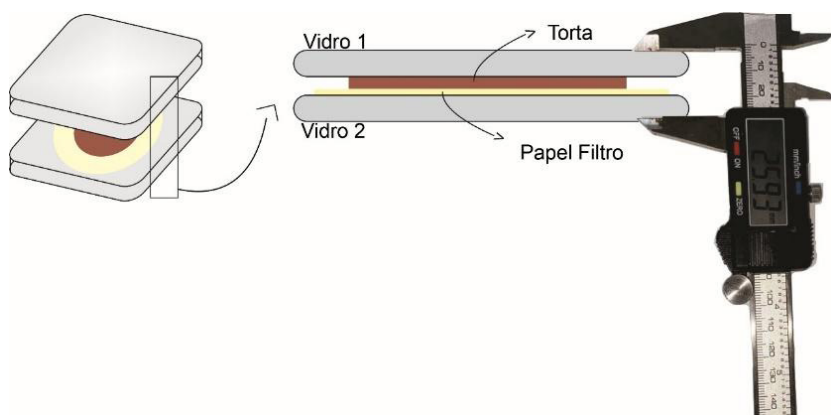


Figura 3. Procedimento de determinação de espessura da torta de filtração.

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).

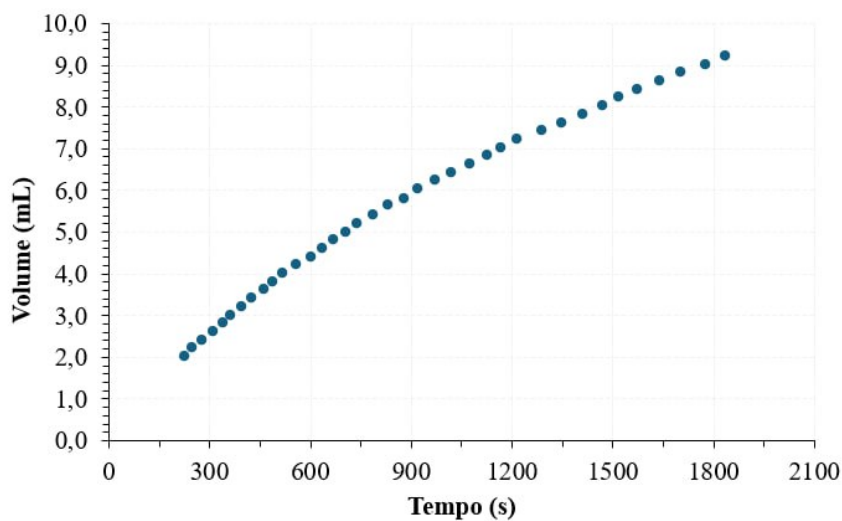
4. ESTUDO DE CASO

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 α , respectivamente.

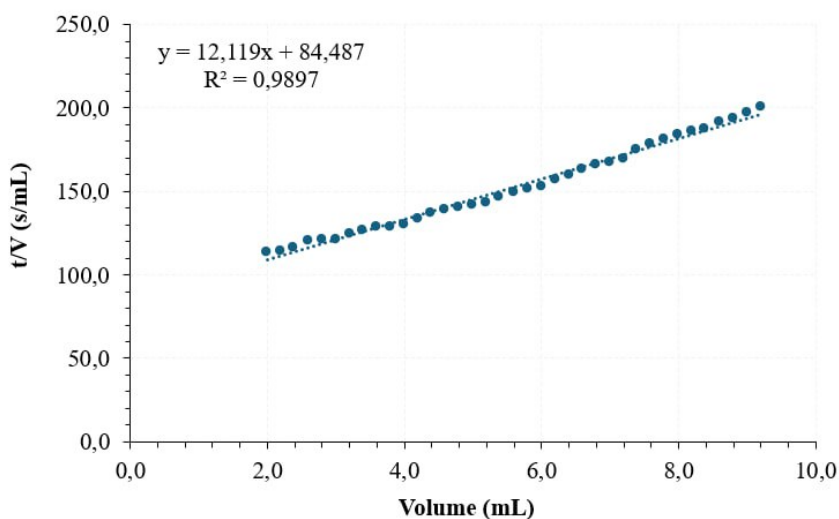
Tempo (s)	Volume (mL)	t/V (s/mL)	Tempo (s)	Volume (mL)	t/V (s/mL)
81	0,6	135,0	744	5,2	143,1
118	1,0	118,0	792	5,4	146,7
156	1,2	130,0	836	5,6	149,3
185	1,6	115,6	880	5,8	151,7
205	1,8	113,9	920	6,0	153,3
227	2,0	113,5	973	6,2	156,9
251	2,2	114,1	1022	6,4	159,7
280	2,4	116,7	1077	6,6	163,2
313	2,6	120,4	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.



(a)



(b)

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 ($y = 12,119x + 84,487$) 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:

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

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

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.

$$C = s\rho \quad (\text{Equação 7})$$

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.

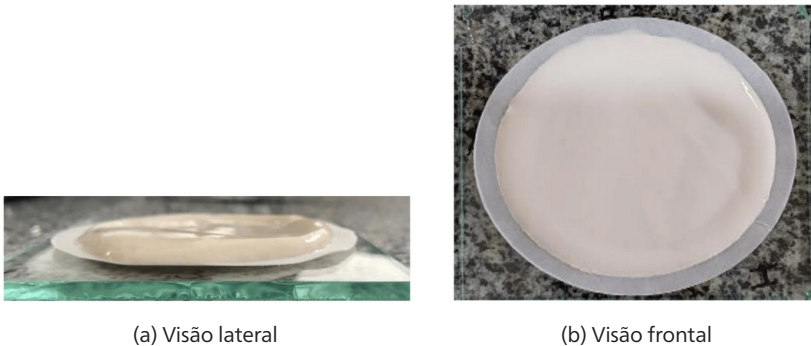


Figura 6. Torta de filtração obtida no experimento (a) Visão lateral e (b) Visão frontal.

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 Interciência, 2004. v. 1.

TABELA DE CONVERSÃO DE UNIDADES

Comprimento	1 km = 1000 m	1 polegada (in) = 2,54 cm
	1 m = 100 cm	1 pé (ft) = 30,48 cm
	1 cm = 10^{-2} m	1 pé (ft) = 12 in
	1 mm = 10^{-3} m	1 milha (mi) = 1,609 km
	1 micron (μ) = 10^{-6} m	1 cm = 0,3937 in
	1 milímicron (m μ) = 10^{-9} m	1 m = 39,37 in
	1 angstrom (\AA) = 10^{-10} m	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	$1 \text{ J} = 1 \text{ N.m} = 10^7 \text{ ergs} = 0,7376 \text{ ft.lbf} = 0,2389 \text{ cal} = 9,481.10^{-4} \text{ BTU}$ $1 \text{ ft.lbf} = 1,356 \text{ J} = 0,3239 \text{ cal} = 1,285.10^{-3} \text{ BTU}$ $1 \text{ cal} = 4,186 \text{ J} = 3,087 \text{ ft.lbf} = 3,968.10^{-3} \text{ BTU}$ $1 \text{ BTU} = 778 \text{ ft.lbf} = 1055 \text{ J} = 0,293 \text{ watt.h}$ $1 \text{ kw.h} = 3,60.10^6 \text{ J} = 860,0 \text{ kcal} = 3413 \text{ BTU}$ $1 \text{ ev (elétron volt)} = 1,602.10^{-19} \text{ J}$
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	$1 \text{ N/m}^2 = 10 \text{ dinas/cm}^2 = 9,869.10^{-6} \text{ atm} = 2,089.10^{-2} \text{ lbf/ft}^2 = 1,45.10^{-4} \text{ lbf/in}^2$ $1 \text{ lbf/in}^2 = 6895 \text{ N/m}^2 = 5,171 \text{ cmHg} = 27,68 \text{ in H}_2\text{O}$ $1 \text{ atm} = 1,013.10^5 \text{ N/m}^2 = 14,7 \text{ lbf/in}^2 = 76 \text{ cmHg} = 406,8 \text{ inH}_2\text{O}$ $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 10^{-5} \text{ atm}$ $1 \text{ Bar} = 0,987 \text{ atm} = 14,5 \text{ psia} = 10^5 \text{ N/m}^2$
Viscosidade	$1 \text{ cP} = 10^{-3} \text{ Pa.s}$
Constante dos gases	$R = 0,082 \text{ atm} \cdot \text{L/mol.K}$

TABELA DA SÉRIE DE PENEIRAS TYLER

Série completa com intervalo de 2 ¼.

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