



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.

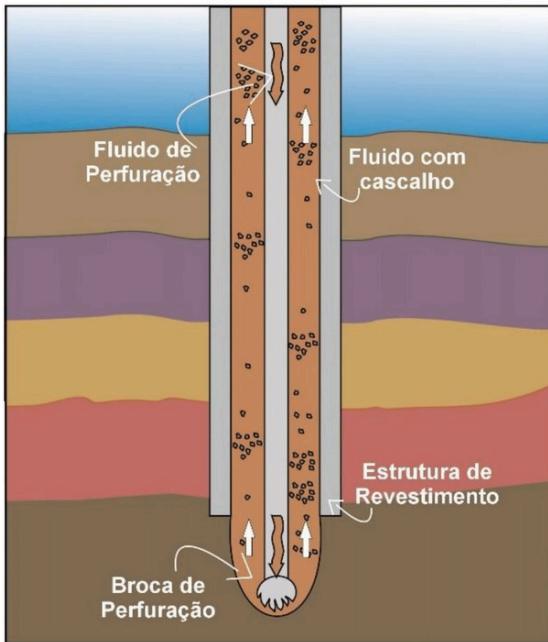


Figura 1. Esquema do fluido de perfuração na coluna.

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.

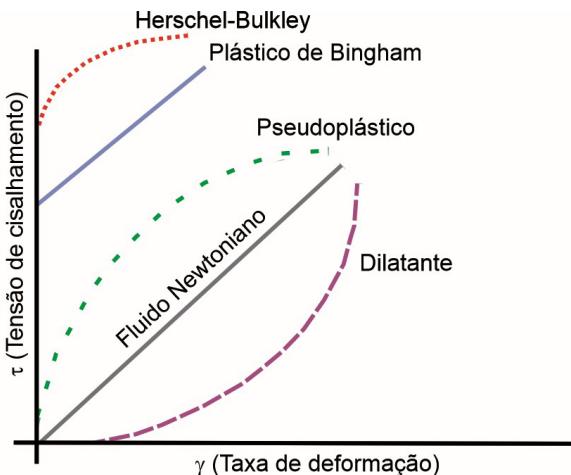


Figura 2. Curvas de fluxo dos modelos reológicos.

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).

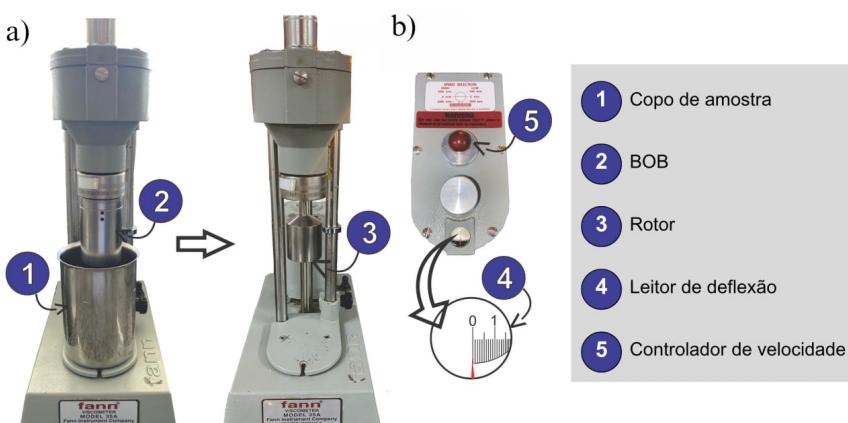


Figura 3. Viscosímetro Fann 35-A, (a) Visão frontal e (b) Visão superior.

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).

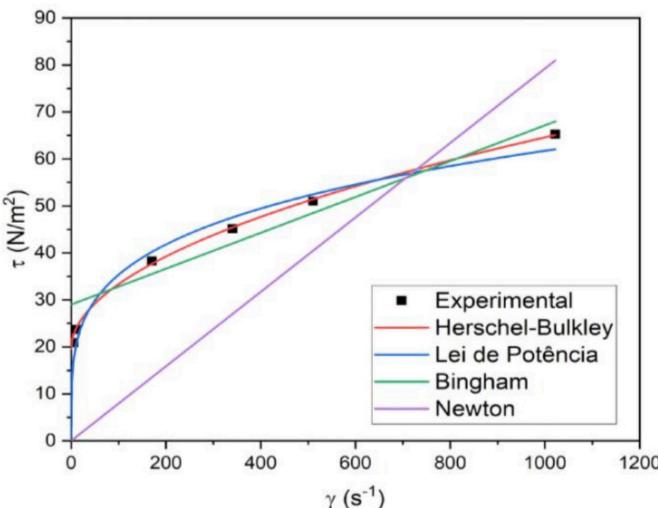


Figura 4. Curva de fluxo de tensão *versus* taxa de cisalhamento para o fluido aquoso estudado.

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.