



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EXPLORAÇÃO  
PETROLÍFERA E MINERAL**



**Ruth Luna do Nascimento Gonçalves**

**EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE SÓLIDOS NO  
ESCOAMENTO DE EMULSÕES EM UM POÇO  
UTILIZANDO A FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL**

**CAMPINA GRANDE - PB**

**Dezembro de 2020**

**Ruth Luna do Nascimento Gonçalves**

**EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE SÓLIDOS NO ESCOAMENTO DE  
EMULSÕES EM UM POÇO UTILIZANDO A FLUIDODINÂMICA  
COMPUTACIONAL**

Dissertação apresentada à Universidade  
Federal de Campina Grande, como requisito  
parcial para obtenção do título de Mestre em  
Exploração Petrolífera e Mineral.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Luciana Viana Amorim

Coorientador: Prof. Dr. Tony Herbert Freire de Andrade

**CAMPINA GRANDE - PB**

**Dezembro de 2020**

G635e

Gonçalves, Ruth Luna do Nascimento.

Efeitos da incorporação de sólidos no escoamento de emulsões em um poço utilizando a fluidodinâmica computacional / Ruth Luna do Nascimento Gonçalves. - Campina Grande, 2021.

71 f. : Color.

Dissertação (Mestrado em Exploração Petrolífera e Mineral) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2020.

"Orientação: Profa. Dra. Luciana Viana Amorim, Prof. Dr. Tony Herbert Freire de Andrade".

Referências.

1. Engenharia de Petróleo. 2. Emulsões Inversas. 3. Hidráulica de Perfuração. 4. Modelo Numérico. 5. Perda de Carga. 6. Anular Concêntrico. I. Amorim, Luciana Viana Amorim. II. Andrade, Tony Herbert Freire de. III. Título.

CDU 665.6/.7(043)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
POS-GRADUACAO EXP. PETROLIFERA E MINERACAO  
Rua Aprígio Veloso, 882, - Bairro Universitário, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

## FOLHA DE ASSINATURA PARA TESES E DISSERTAÇÕES

**RUTH LUNA DO NASCIMENTO GONÇALVES**

EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE SÓLIDOS NO ESCOAMENTO DE EMULSÕES EM UM POÇO UTILIZANDO A FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral - PPGEPM - UFCG como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Exploração Petrolífera e Mineral .

Aprovada em: 17/12/2020

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Luciana Viana Amorim- Orientadora PPGEPM- UFCG

Prof. Dr. Tony Herbert Freire de Andrade – Segundo orientador PPGEPM - UFCG

Examinador: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima - Examinador Externo UAEM - UFCG

Examinador: Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto - Examinador Externo – UAEQ-UFCG



Documento assinado eletronicamente por **ELISSANDRA NASCIMENTO DE MOURA LIMA, COORDENADOR (A)**, em 12/02/2021, às 12:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **TONY HERBERT FREIRE DE ANDRADE, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/02/2021, às 20:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).

Documento assinado eletronicamente por **SEVERINO RODRIGUES DE FARIAS NETO, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 13/02/2021, às 00:13, conforme horário oficial de Brasília, com



fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **LUCIANA VIANA AMORIM, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/02/2021, às 09:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ANTONIO GILSON BARBOSA DE LIMA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/02/2021, às 13:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **1276580** e o código CRC **08C27E17**.

*“All human wisdom is contained  
in these two words: Wait and Hope”*

**Alexandre Dumas**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer à minha família, por todo suporte e incentivo durante todos esses anos, desde o começo da graduação até o final deste mestrado. Em especial à minha mãe, Janete, que nunca mediu esforços para que eu tivesse uma boa educação e pudesse realizar todos os meus sonhos.

À minha vó, Neuza, que me ensinou a ler e nunca deixou de acreditar que eu teria sucesso, tanto na vida pessoal como profissional. Sobretudo porque ela sempre me “socorria” nos momentos de angústias, quando eu duvidava de mim mesma.

Aos meus irmãos, Otávio, Raquel e Paulo Emílio, que, mesmo sem saber, trouxeram leveza durante momentos difíceis.

Ao meu pai, Emiliano, por sempre se orgulhar das minhas conquistas, por menores que fossem.

Ao meu padrasto, Nilton, e madrasta, Ana Paula, por sempre se preocuparem com meu bem estar.

Aos meus orientadores, professora Luciana Viana Amorim e professor Tony Herbert Freire de Andrade, por toda a paciência, dedicação e incontáveis horas de ensinamentos extremamente necessárias para a realização deste trabalho. Agradeço a confiança depositada em mim.

Aos amigos feitos no Programa de Pós Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral, sem os quais as aulas não teriam sido as mesmas, nem os perrengues.

A todos do PeFLab, pelo companheirismo e ajuda nas horas necessárias, pelas conversas e marmitas divididas na hora do almoço, pelos conselhos e lições, além de amizades que espero levar para a vida.

A todos do SimPetro, cuja ajuda foi essencial à realização deste trabalho.

Ao Laboratório de Pesquisa em Fluidos de Perfuração, PefLab, e à Universidade Federal de Campina Grande, pela infraestrutura e a Petrobras pelo incentivo à pesquisa e apoio financeiro.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram que alguma forma, direta ou indiretamente, para que este trabalho fosse concluído.

Muito obrigada!

# EFEITOS DA INCORPORAÇÃO DE SÓLIDOS NO ESCOAMENTO DE EMULSÕES EM UM POÇO UTILIZANDO A FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

## RESUMO

Este trabalho visou estudar o escoamento de emulsões inversas de base olefínica incorporadas com diferentes sólidos no anular de um poço vertical, e a perda de carga gerada por esse escoamento, utilizando a fluidodinâmica computacional. Para isso, foi considerado um poço vertical com comprimento de 5 metros e anular concêntrico, com escoamento laminar e permanente. A perda de carga foi analisada em função da concentração de sólidos e das propriedades da emulsão. Os resultados mostraram que os perfis de taxa de cisalhamento estavam condizentes com a literatura, apresentando valor máximo nas paredes, e zero nas proximidades da região central, para o escoamento completamente desenvolvido e que as curvas de viscosidade numérica apresentaram um excelente ajuste com as curvas experimentais. Ainda, para as emulsões incorporadas com areia e carbonato de cálcio, o aumento da perda de carga não foi muito expressivo quando a concentração passou de 5 para 10%. Mostraram também que com o aumento da densidade, a perda de carga também aumentou. Apenas para as emulsões incorporadas com argila, o índice de comportamento ( $n$ ) apresentou uma correlação direta com a perda de carga. Além disso, o índice de consistência ( $k$ ) foi o parâmetro que exerceu maior influência na perda de carga, tendo a emulsão com maior valor de  $k$  apresentado a maior perda de carga. A perda de carga aumentou com o aumento da vazão do escoamento, e a relação entre as duas variáveis foi linear. A potência hidráulica da bomba apresentou variações dependentes da emulsão circulada e da vazão volumétrica, tendo uma diferença máxima de 1,63 hp para as emulsões E0 e EA15 circulando com a maior vazão. Por fim, a presença de sólidos incorporados às emulsões provocou um aumento na perda de carga, sendo a argila, o sólido que mais exerceu impacto neste parâmetro hidráulico.

**Palavras-Chave:** Emulsões inversas; hidráulica de perfuração; modelo numérico; perda de carga; anular concêntrico.

# EFFECTS OF THE INCORPORATION OF SOLIDS IN THE FLOW OF EMULSIONS IN A WELL USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

## ABSTRACT

This work aimed to study the flow of invert olefinic emulsions incorporated with different solids (bentonite clay, calcium carbonate and sand) in the annular of a vertical well, and the head loss generated by this flow, using Computational Fluid Dynamics. For this, it was considered a vertical well with a length of 5 meters and a concentric annular, with steady state regime and laminar flow. The head loss was analyzed according to the concentration of solids and the properties of the emulsions. The results showed that the shear rate profiles were consistent with the literature, with maximum value near the walls, and zero in the proximities of the central region when the flow was fully developed, and that the numerical viscosities curves showed an excellent fit with the experimental curves. Furthermore, for the emulsions incorporated with sand and calcium carbonate, the increase in head loss was not very significant when the concentration went from 5 to 10%. They also showed that with increasing density, head loss also increased. Only for emulsions incorporated with clay, the behavior index ( $n$ ) showed a direct correlation with the head loss. In addition, the consistency index ( $k$ ) was the parameter that exerted the greatest influence on head loss, with the emulsion with the highest value of  $k$  presenting the greatest head loss. The head loss increased with the increase in flow, and the relationship between the two variables was linear. The pump hydraulic horsepower varied depending on the circulated emulsion and the volumetric flow, with a maximum difference of 1.63 hp for the emulsions E0 and EA15 circulating with the highest flow rate. Finally, the presence of solids incorporated into the emulsions caused an increase in head loss, with clay being the solid that most impacted this hydraulic parameter.

**Keywords:** Invert emulsions; drilling hydraulics; numerical model; head loss; concentric annular.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1.</b> Escoamento laminar em um tubo circular. ....  | 16 |
| <b>Figura 2.</b> Escoamento laminar completamente desenvolvido de um fluido. ....  | 17 |
| <b>Figura 3.</b> Curvas de viscosidade dos fluidos: (A) newtoniano, (B) binghamiano, (C) pseudoplástico e (D) dilatante. ....  | 20 |
| <b>Figura 4.</b> Escoamento através de um cotovelo redutor de 90°. ....  | 23 |
| <b>Figura 5.</b> Diagrama de Moody. ....   | 25 |
| <b>Figura 6.</b> Contração e expansão súbita da área de um tubo. ....  | 26 |
| <b>Figura 7.</b> Coeficientes de perda para escoamento através de mudança súbita de área. ....   | 26 |
| <b>Figura 8.</b> Balanço de massa em um volume finito. ....  | 30 |
| <b>Figura 9.</b> Modelo geométrico utilizado. ....   | 35 |
| <b>Figura 10.</b> Malhas (a) 1, (b) 2, (c) 3 e (d) 4 geradas na saída do modelo numérico. ....   | 39 |
| <b>Figura 11.</b> Perfis de velocidade gerados pelas malhas estudadas. ....  | 41 |
| <b>Figura 12.</b> Regiões do anular. ....  | 42 |
| <b>Figura 13.</b> Perfil de taxa de cisalhamento na seção transversal para o escoamento completamente desenvolvido na região 2 do anular. (Altura: 4 metros). ....     | 44 |
| <b>Figura 14.</b> Taxa de cisalhamento gerada durante o escoamento da emulsão E0 nas alturas de a) 2,7m, b) 3,0m, c) 3,3m e d) 3,6m do poço (porção 2 do anular). .... | 45 |
| <b>Figura 15.</b> Taxa de cisalhamento gerada durante o escoamento das emulsões com teores de a) 5%, b) 10% e c) 15% de argila a uma altura de 2,7m. ....              | 46 |
| <b>Figura 16.</b> Taxa de cisalhamento gerada durante o escoamento das emulsões com teores de a) 5%, b) 10% e c) 15% de carbonato de cálcio a uma altura de 2,7m. .... | 47 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 17.</b> Taxa de cisalhamento gerada durante o escoamento das emulsões com teores de a) 5%, b) 10% e c) 15% de areia a uma altura de 2,7m.....   | 48 |
| <b>Figura 18.</b> Comparação entre as curvas de viscosidade numérica e experimental para a emulsão sem sólidos.....   | 49 |
| <b>Figura 19.</b> Curvas de viscosidade numérica e experimental para as emulsões com teores de argila de a) 5%, b)10% e c)15%.....  | 50 |
| <b>Figura 20.</b> Curvas de viscosidade numérica e experimental para as emulsões com teores de carbonato de cálcio de a) 5%, b)10% e c)15%.....   | 51 |
| <b>Figura 21.</b> Curvas de viscosidade numérica e experimental para as emulsões com teores de areia de a) 5%, b)10% e c)15%.....   | 52 |
| <b>Figura 22.</b> Relação entre a perda de carga e o aumento da concentração de sólidos nas emulsões. ....  | 53 |
| <b>Figura 23.</b> Aumento percentual da perda de carga entre cada concentração de sólidos. ....   | 54 |
| <b>Figura 24.</b> Relação entre a perda de carga e a densidade das emulsões.....  | 55 |
| <b>Figura 25.</b> Relação entre a perda de carga e o índice de comportamento das emulsões.....  | 56 |
| <b>Figura 26.</b> Relação entra a perda de carga e o índice de consistência das emulsões. ....  | 57 |
| <b>Figura 27.</b> Perda de carga em função da vazão volumétrica das emulsões a) sem sólidos, b) incorporadas com argila, c) incorporadas com carbonato de cálcio e d) incorporadas com areia..... | 60 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabela 1.</b> Expoentes para a Equação (10) e razão entre a velocidade média e máxima.....      | 19 |
| <b>Tabela 2.</b> Dimensões do modelo geométrico.....   | 36 |
| <b>Tabela 3.</b> Propriedades das emulsões utilizadas nas simulações. ....                         | 37 |
| <b>Tabela 4.</b> Condições de contorno aplicadas ao modelo numérico.....                           | 37 |
| <b>Tabela 5.</b> Características das malhas estudadas. ....  | 39 |
| <b>Tabela 6.</b> Dados necessários para a validação do modelo numérico.....                        | 40 |
| <b>Tabela 7.</b> Erro percentual entre os valores de perda de carga numérico e analítico.<br>..... | 42 |
| <b>Tabela 8.</b> Número de Reynolds para cada emulsão nas duas regiões do anular. ....             | 43 |
| <b>Tabela 9.</b> Coeficientes das curvas ajustadas da perda de carga vs. vazão volumétrica.....    | 61 |
| <b>Tabela 10.</b> Potência hidráulica necessária para neutralizar a perda de carga.....            | 62 |

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b>  | <b>13</b> |
| 1.1. Objetivo geral   | 14        |
| 1.2. Objetivos específicos                                  | 14        |
| <b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>                             | <b>15</b> |
| 2.1. Tipos de escoamento                                    | 15        |
| 2.1.1. <i>Escoamento laminar monofásico</i>                 | 16        |
| 2.1.2. <i>Escoamento turbulento monofásico</i>              | 18        |
| 2.1.3. <i>Escoamento transicional monofásico</i>            | 19        |
| 2.2. Comportamento reológico dos fluidos                    | 19        |
| 2.3. Perda de carga   | 21        |
| 2.3.1. <i>Velocidade média do fluido</i>                    | 22        |
| 2.3.2. <i>Número de Reynolds</i>                            | 22        |
| 2.3.3. <i>Cálculo da perda de carga e o fator de atrito</i> | 23        |
| 2.4. Potência hidráulica da bomba                           | 26        |
| 2.5. Fluidodinâmica computacional                           | 27        |
| 2.5.1. <i>Métodos numéricos</i>                             | 28        |
| 2.5.1.1. <i>Método dos Volumes Finitos (MVF)</i>            | 29        |
| 2.5.2. <i>Tipos de malha</i>                                | 31        |
| 2.6. Estado da arte   | 32        |
| <b>3. METODOLOGIA</b>                                       | <b>35</b> |
| 3.1. Formulação do problema                                 | 35        |
| 3.2. Modelagem matemática                                   | 38        |
| 3.3. Validação da malha                                     | 38        |
| 3.4. Validação do modelo numérico                           | 40        |
| <b>4. RESULTADOS</b>  | <b>40</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>4.1. Dependência da malha</b>                                  | <b>40</b> |
| <b>4.2. Comparação dos resultados numéricos com os analíticos</b> | <b>42</b> |
| <b>4.3. Avaliação do escoamento</b>                               | <b>42</b> |
| <b>4.4. Perda de carga</b>  | <b>53</b> |
| 4.4.1. <i>Perda de carga vs. teor de sólidos</i>                  | 53        |
| 4.4.2. <i>Perda de carga vs. densidade</i>                        | 55        |
| 4.4.3. <i>Perda de carga vs. parâmetros reológicos</i>            | 56        |
| 4.4.4. <i>Perda de carga vs. vazão volumétrica</i>                | 59        |
| <b>4.5. Potência hidráulica da bomba</b>                          | <b>62</b> |
| <b>5. CONCLUSÕES</b>  | <b>63</b> |
| <b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>                        | <b>65</b> |
| <b>REFERÊNCIAS</b>  | <b>66</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

O setor de petróleo tem hoje um papel preponderante na oferta mundial de energia e continuará a ser relevante no longo prazo. De acordo com o Plano de Negócios e Gestão 2020-2024 da Petrobras, a empresa destinará 85% dos seus investimentos totais para o setor de Exploração e Produção.

Dentre as etapas de exploração, a perfuração de poços destaca-se como uma das fases mais determinantes, sendo responsável por grande parte dos investimentos (SANTOS, 2017). As operações de perfuração de poços de petróleo são viabilizadas pela circulação de fluidos no poço, conhecidos como fluidos de perfuração (DARLEY e GRAY, 1988).

O fluido de perfuração é o único componente do processo de construção do poço que permanece em contato com o mesmo durante todo o processo de perfuração, e são desenvolvidos e formulados para atuar de forma eficiente sob condições de poço esperadas (WEST, HALL e SEATON, 2006).

Os fluidos de perfuração podem ser aquosos ou não-aquosos. No grupo de fluidos não-aquosos encontram-se os fluidos de perfuração sintéticos, que fornecem lubricidade e estabilidade em altas temperaturas, especialmente em poços mais difíceis de perfurar, como em grandes lâminas d'água e poços direcionais. Além disso, oferecem uma vantagem sobre os fluidos base óleo em termos de potenciais problemas ambientais acerca de seu descarte, seja acidental ou intencional, pois os fluidos sintéticos são desenvolvidos para serem menos tóxicos e degradar mais rapidamente em sedimentos marinhos. O composto orgânico sintético mais comum nos fluidos de perfuração sintéticos são os hidrocarbonetos acíclicos monoinsaturados, como, por exemplo, as olefinas (STOUT e PAYNE, 2017).

Os fluidos de perfuração sintéticos são sistemas de emulsão inversa, nas quais um líquido sintético forma a fase contínua e uma salmoura, geralmente de NaCl ou CaCl<sub>2</sub>, atua como a fase dispersa (SILVA, 2014).

Durante a perfuração, partículas sólidas provenientes das formações trituradas pela broca podem ser incorporadas ao fluido de perfuração sintético. Esses sólidos podem promover mudanças nas propriedades físicas e reológicas das emulsões que formam a base destes fluidos, causando, conseqüentemente, mudanças nos parâmetros hidráulicos do poço, como, por exemplo, na perda de carga.

Um dos principais contribuintes da perda de carga é o atrito causado pelas forças viscosas inerentes aos fluidos de perfuração. Quando há presença de sólidos nesses fluidos, a determinação desse fator de atrito demanda um conhecimento das interações das partículas sólidas entre si e com o fluido. As partículas sólidas contribuem com o atrito total do sistema de duas formas: por meio de atrito mecânico e de atrito viscoso. O atrito mecânico acontece pelo contato das partículas sólidas com as paredes da tubulação, já o atrito viscoso ocorre devido as alterações que esses sólidos promovem no fluido que os transportam (MATOUSEK, 2002).

Portanto, estudar o escoamento e a perda de carga gerada durante circulação das emulsões inversas, que constituem a base do fluido de perfuração, é importante para começar a entender como os parâmetros hidráulicos são afetados pela incorporação de sólidos ao fluido durante a perfuração.

### **1.1. Objetivo geral**

Estudar o escoamento de emulsões inversas de base olefínica incorporadas com diferentes sólidos no anular de um poço vertical, e a perda de carga gerada por esse escoamento, utilizando a fluidodinâmica computacional.

### **1.2. Objetivos específicos**

- Avaliar o escoamento das emulsões no anular do poço através do cálculo do número de Reynolds e da análise das curvas de taxa de cisalhamento e de viscosidade;
- Investigar o efeito das propriedades das emulsões (densidade e parâmetro reológicos), da vazão volumétrica e do teor de sólidos na perda de carga após a incorporação de argila bentonítica, carbonato de cálcio e areia;
- Calcular a potência hidráulica de bombeio para a circulação de cada emulsão estudada em diferentes vazões volumétricas.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Tipos de escoamento

Em geral, os escoamentos viscosos podem ser divididos em duas categorias: laminar e turbulento. Entretanto, o limite entre ambos não é perfeitamente definido. A principal diferença entre as duas foi demonstrada por Reynolds em 1883: após a injeção de uma pequena corrente de corante no escoamento de água em um tubo, à baixas vazões, Reynolds observou que o corante seguiu um caminho direto e bem definido indicando que o fluido se movia em camadas paralelas. Tal comportamento foi chamado de escoamento laminar. Contudo, com o aumento da vazão além de um certo ponto crítico, a corrente de corante rompeu em forma de filamentos irregulares e se espalhou por toda a seção transversal do tubo, indicando a presença de um escoamento caótico, que foi denominado de turbulento (KUNDU; COHEN; DOWLING, 2012).

Dessa forma, para se determinar o regime de escoamento ao qual um fluido está submetido em uma tubulação, o número de Reynolds (Equação 1) é utilizado.

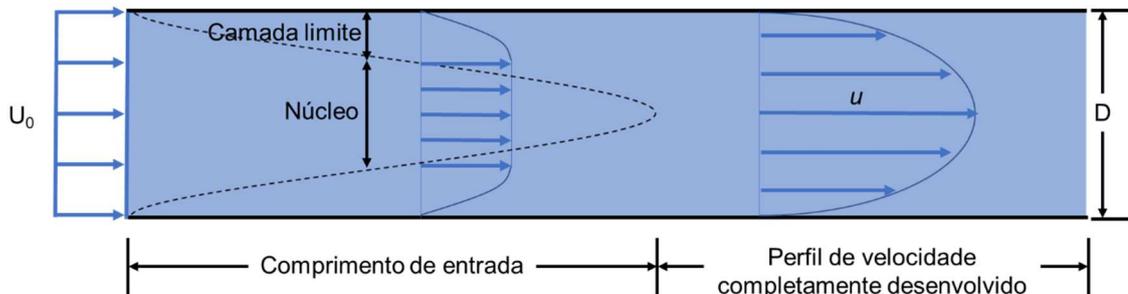
$$Re = \frac{\rho \bar{V} d}{\mu} \quad (1)$$

onde  $\rho$  é a densidade,  $\bar{V}$  é a velocidade média,  $d$  é o diâmetro do tubo e  $\mu$  é a viscosidade do fluido.

A velocidade do fluido, ou o número de Reynolds, determinará o regime de escoamento: laminar ou turbulento. Para números de Reynolds até 2300, o escoamento é considerado laminar. Já a transição para a turbulência, em condições normais, ocorre em  $Re \approx 2300$ , podendo chegar até cerca de 100.000 para o escoamento em tubos com seção circular. Em um poço de petróleo, por exemplo, o número de Reynolds é diferente para diferentes partes do sistema. Dessa forma, o escoamento pode ser laminar nos tubos de perfuração e turbulento nos comandos (BOURGOYNE JUNIOR *et al.*, 1986; HERIOT WATT UNIVERSITY, 2005; FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2014).

### 2.1.1. Escoamento laminar monofásico

A Figura 1 ilustra o comportamento do perfil de velocidade do escoamento laminar em uma tubulação circular.



**Figura 1.** Escoamento laminar em um tubo circular.

Fonte: Adaptado de Fox, Mcdonald e Pritchard (2014).

Devido à condição de não deslizamento, a velocidade próxima à parede deve ser zero ao longo de todo o tubo. Conforme a velocidade nas proximidades da parede da tubulação vai diminuindo, a velocidade no centro vai aumentando ligeiramente para compensar, criando um gradiente de velocidade ao longo do tubo (ÇENGEL e CIMBALA, 2012; FOX, MCDONALD e PRITCHARD, 2014).

Dois regiões são criadas no escoamento: uma, onde os efeitos do cisalhamento viscoso, causada pela viscosidade dos fluidos, é sentida e as variações de velocidade são significativas, chamada camada limite; e outra, onde os efeitos do atrito são desprezíveis e a velocidade permanece constante na direção radial, chamada núcleo ou região de escoamento irrotacional (central) (ÇENGEL e CIMBALA, 2012; FOX, MCDONALD e PRITCHARD, 2014).

A uma certa distância da entrada, a camada limite em desenvolvimento sobre a parede atinge o centro do tubo, tornando o escoamento completamente viscoso. Assim, o perfil de velocidade muda, com o desaparecimento do núcleo, e se torna constante pelo resto do comprimento do tubo, dando início ao escoamento completamente desenvolvido. A região, a partir da entrada até o início do escoamento completamente desenvolvido, é chamada de comprimento de entrada hidrodinâmica (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2014).

O comprimento de entrada é afetado pelo número de Reynolds, e pode ser calculado através da Equação (2) (WHITE, 2011).

$$L = 0,06 Re d \quad (2)$$

A velocidade pode ser calculada usando a Equação (3).

$$V = -\left(\frac{r_0^2 - r^2}{4\mu}\right)\left(\frac{\gamma\Delta h}{\Delta L}\right) \quad (3)$$

onde  $r_0$  é o raio do tubo,  $r$  é a coordenada radial,  $\mu$  é a viscosidade,  $\gamma$  é o peso específico,  $\Delta h$  é a variação na altura piezométrica, e  $\Delta L$  é o comprimento do tubo.

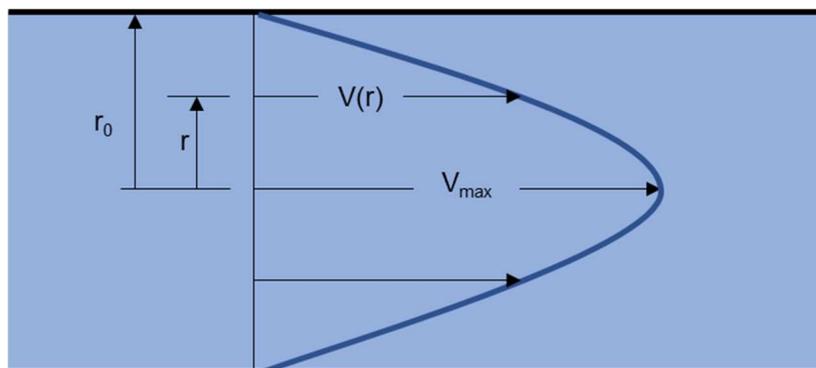
Com a velocidade máxima ocorrendo em  $r_0 = 0$ , tem-se:

$$V_{max} = -\left(\frac{r_0^2}{4\mu}\right)\left(\frac{\gamma\Delta h}{\Delta L}\right) \quad (4)$$

Combinando as Equações (3) e (4), obtém-se a equação para o perfil de velocidade de um escoamento laminar completamente desenvolvido, apresentada na Equação (5).

$$V(r) = V_{max} \left(1 - \left(\frac{r}{r_0}\right)^2\right) \quad (5)$$

As variáveis podem ser visualizadas na Figura 2.



**Figura 2.** Escoamento laminar completamente desenvolvido de um fluido.

Fonte: Adaptado de Elger *et al.* (2013).

Substituindo a Equação (3) na equação de vazão, obtém-se:

$$Q = \int V dA = - \int_0^{r_0} \frac{r_0^2 - r^2}{4\mu} \left( \frac{\gamma \Delta h}{\Delta L} \right) (2\pi r dr) \quad (6)$$

Resultando em:

$$Q = - \left( \frac{\pi r_0^4}{8\mu} \right) \left( \frac{\gamma \Delta h}{\Delta L} \right) \quad (7)$$

Substituindo a Equação (7) na equação da vazão ( $Q = VA$ ), obtém-se a equação para a velocidade média:

$$\bar{V} = \left( \frac{r_0^2}{8\mu} \right) \left( \frac{\gamma \Delta h}{\Delta L} \right) \quad (8)$$

Comparando-se as equações de velocidade máxima (Equação 4) e velocidade média (Equação 8), tem-se que:

$$\bar{V} = \frac{V_{max}}{2} \quad (9)$$

Conceitualmente, o regime laminar ocorre quando as forças viscosas são maiores do que as forças inerciais. Dessa forma, para fluidos com alta viscosidade, o escoamento laminar pode ser atingido com uma relativa facilidade, enquanto para fluidos com viscosidades muito baixas (água, a maioria dos gases etc.), estabelecer um escoamento completamente laminar pode ser uma tarefa difícil (RAMSEY, 2019).

### 2.1.2. Escoamento turbulento monofásico

O escoamento turbulento completamente desenvolvido é caracterizado por uma agitação vigorosa através de toda a área transversal do escoamento. Para considerações de perda de carga, a perda de pressão é proporcional ao quadrado da vazão (RAMSEY, 2019).

Como o escoamento turbulento envolve um amplo espectro de propriedades com comprimento e escalas de tempo aleatórias, descrevê-lo se torna uma tarefa

difícil (WHITE, 2006). No escoamento laminar, a equação de tensão de cisalhamento ( $\tau = \mu\gamma$ ) é utilizada para o desenvolvimento de equações úteis, como a equação para a vazão e para a velocidade média. Para o escoamento turbulento não existe uma equação de tensão de cisalhamento semelhante que possa ser utilizada para a dedução de equações equivalentes às Equações (7) e (8) (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2014).

O escoamento turbulento é representado em cada ponto pela velocidade média temporal, que é frequentemente descrita usando uma equação chamada de fórmula da potência (ELGER *et al.*, 2013; FOX, MCDONALD e PRITCHARD, 2014).

$$\frac{u(r)}{u_{max}} = \left(\frac{r_0 - r}{r_0}\right)^m \quad (10)$$

onde  $u_{max}$  é a velocidade no centro do tubo e  $m$  é uma variável determinada empiricamente que depende do número de Reynolds, como mostrado na Tabela 1.

**Tabela 1.** Expoentes para a Equação (10) e razão entre a velocidade média e máxima

Fonte: Adaptado de Elger *et al.* (2013).

| <b>Re</b>                     | <b><math>4 \times 10^3</math></b> | <b><math>2,3 \times 10^4</math></b> | <b><math>1,1 \times 10^5</math></b> | <b><math>1,1 \times 10^6</math></b> | <b><math>3,6 \times 10^6</math></b> |
|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| <b><i>m</i></b>               | $\frac{1}{6}$                     | $\frac{1}{6,6}$                     | $\frac{1}{7}$                       | $\frac{1}{8,8}$                     | $\frac{1}{10}$                      |
| <b><math>u_{max}/V</math></b> | 1,26                              | 1,24                                | 1,22                                | 1,18                                | 1,16                                |

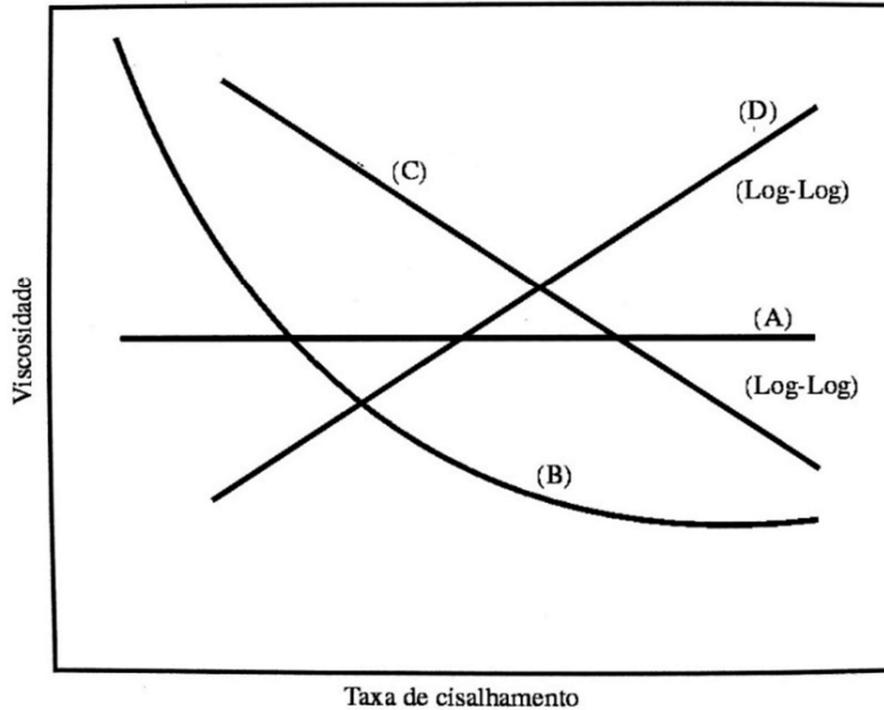
### 2.1.3. Escoamento transicional monofásico

O escoamento transicional se desenvolve em algum ponto entre o escoamento laminar e o escoamento turbulento. Nesse caso, a pressão é proporcional à vazão elevada a um exponencial entre 1 e 2, que não pode ser previsto, atualmente, para o escoamento em um poço de petróleo (RAMSEY, 2019).

Em poços de petróleo, o escoamento no anular e na coluna é, muito provavelmente, transicional por natureza (RAMSEY, 2019).

## 2.2. Comportamento reológico dos fluidos

Uma forma de se representar o comportamento reológico dos fluidos é através da relação entre a viscosidade e a taxa de cisalhamento, para uma mesma condição de temperatura e pressão, representada graficamente pelas curvas de viscosidade, como pode ser observado na Figura 3 (MACHADO, 2002).



**Figura 3.** Curvas de viscosidade dos fluidos: (A) newtoniano, (B) binghamiano, (C) pseudoplástico e (D) dilatante.

Fonte: Machado (2002).

Os fluidos viscosos são classificados em fluidos Newtonianos e fluidos não-Newtonianos. Das curvas apresentadas, apenas a curva (A) não está no grupo dos fluidos não-Newtonianos.

Os fluidos Newtonianos são os fluidos cuja taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento são proporcionais, apresentando, desta forma, um valor constante para a viscosidade (MACHADO, 2002).

A Equação (11) representa o modelo Newtoniano.

$$\tau = \mu\gamma_m \tag{11}$$

onde  $\tau$  é a tensão de cisalhamento e  $\gamma_m$  é a taxa de cisalhamento.

Os fluidos não-Newtonianos são caracterizados pela relação não constante entre a taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento, ou seja, fluidos desse tipo não possuem um valor único para a viscosidade. Essa varia com a taxa de cisalhamento aplicada (MACHADO, 2002). Os modelos reológicos mais utilizados para descrever o comportamento dos fluidos não-Newtonianos são: o modelo de Bingham, o modelo de Ostwald de Waele (ou modelo de potência) e o modelo de Herschel-Bulkley, representados pelas Equações (12), (13) e (14), respectivamente.

$$\tau = \mu_p \gamma_m + \tau_y \quad (12)$$

onde  $\tau_y$  é o limite de escoamento e  $\mu_p$  é a viscosidade plástica.

$$\tau = K(\gamma_m)^n \quad (13)$$

O índice de comportamento  $n$  representa o afastamento do fluido do modelo Newtoniano. Já o índice de consistência  $K$  indica o grau de resistência do fluido ao escoamento (MACHADO, 2002; GUO e LIO, 2011).

$$\tau = \tau_y + K(\gamma_m)^n \quad (14)$$

O modelo de Herschel-Bulkley é um modelo geral que pode ser reduzido para os modelos de Bingham, quando  $n = 1$ , e de potência, quando  $\tau_0 = 0$  (HAGHSHENAS, 2012).

### 2.3. Perda de carga

Na indústria do petróleo, a determinação das perdas de carga durante a circulação do fluido de perfuração em um poço é de extrema importância, pois a previsão imprecisa pode levar a inúmeros problemas operacionais, como perda de circulação, *kicks* (quando os fluidos da formação invadem o poço durante a perfuração, causado por uma menor pressão no interior do poço em comparação com a pressão da formação), abrasão, desgaste e mal dimensionamento da energia

necessária na sonda (SULTAN *et al.*, 2019). A perda de carga é proporcional à vazão e representa cerca de 5-10% da pressão total de circulação (MACHADO, 2002).

A perda de carga total em um sistema nada mais é do que a soma das perdas maiores (causadas pela fricção) e das perdas menores (causadas pela presença de entradas, acessórios, variações de área, entre outras (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2014). Quando um poço está em condição dinâmica, o fluido em circulação gera fricção, que é dependente, dentre outros fatores, da viscosidade e da velocidade do fluido (IADC, 2014).

De acordo com Haghshenas (2012), os seguintes passos devem ser seguidos para o cálculo da perda de carga:

1. Determinar o comportamento reológico do fluido;
2. Calcular a velocidade média do fluido;
3. Calcular o número de Reynolds;
4. Calcular o fator de atrito relacionado ao regime de escoamento;
5. Determinar a perda de carga na seção determinada.

### 2.3.1. Velocidade média do fluido

A determinação da velocidade média do fluido pode ser feita através das equações (8) e (9) para o escoamento laminar, e da Equação (10) para o escoamento turbulento.

### 2.3.2. Número de Reynolds

A Equação (1) representa o número de Reynolds, porém leva em consideração apenas os fluidos newtonianos. As Equações (15) e (16) representam o número de Reynolds para os modelos de Bingham e de Ostwald de-Waele, respectivamente, também conhecido como modelo de potência.

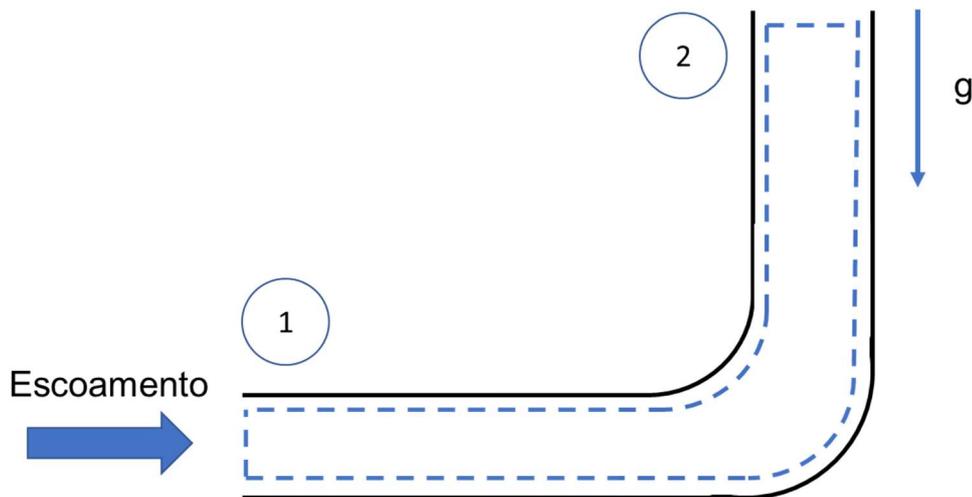
$$Re = \frac{928\rho\bar{V}d}{\mu_p} \quad (15)$$

$$Re = \frac{109000\rho\bar{V}^{(2-n)}}{K} \left[ \frac{0,0208d}{2 + 1/n} \right]^n \quad (16)$$

Ambas as equações foram retiradas de Bourgoyne Junior *et al.* (1986) e estão em unidades de campo, onde  $\rho$  é a densidade em lb/gal,  $\bar{V}$  é a velocidade média em pés/s,  $d$  é o diâmetro do tubo em polegadas,  $\mu_p$  é a viscosidade plástica em centipoise,  $K$  é o índice de consistência em centipoise e  $n$  é o índice de comportamento, adimensional. As variáveis  $K$  e  $n$  são os parâmetros reológicos presentes na equação que define o modelo de Ostwald de-Waele.

### 2.3.3. Cálculo da perda de carga e o fator de atrito

Considerando o escoamento monofásico apresentado na Figura 4, tem-se que a perda de energia total por unidade de massa é determinada pelo balanço de energia apresentado na Equação (17).



**Figura 4.** Escoamento através de um cotovelo redutor de 90°.

Fonte: Adaptado de Fox, Mcdonald e Pritchard (2014).

$$\left( \frac{p_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{\bar{V}_1^2}{2} + gz_1 \right) - \left( \frac{p_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{\bar{V}_2^2}{2} + gz_2 \right) = h_{l_T} \quad (17)$$

A perda de carga pode ser dividida em duas: as perdas causadas pelo atrito do fluido em escoamento, chamadas de perdas distribuídas, e as perdas causadas pela

presença de acessórios, mudanças de área, entre outras, chamadas de perdas localizadas (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2014).

As perdas distribuídas podem ser avaliadas utilizando a Equação (17). Considerando um tubo horizontal e de área constante, esta equação pode ser reduzida para:

$$\frac{\Delta p}{\rho} = h_l \quad (18)$$

Entretanto, como a perda de carga depende apenas dos detalhes do escoamento, ela é independente da orientação do tubo. Dessa forma, a Equação (18) também é aplicável em tubos verticais (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2014).

Outra forma de se calcular a perda de carga maior é aplicando a equação universal da perda de carga, também conhecida como equação de Darcy-Weisbach (ELGER *et al.*, 2013).

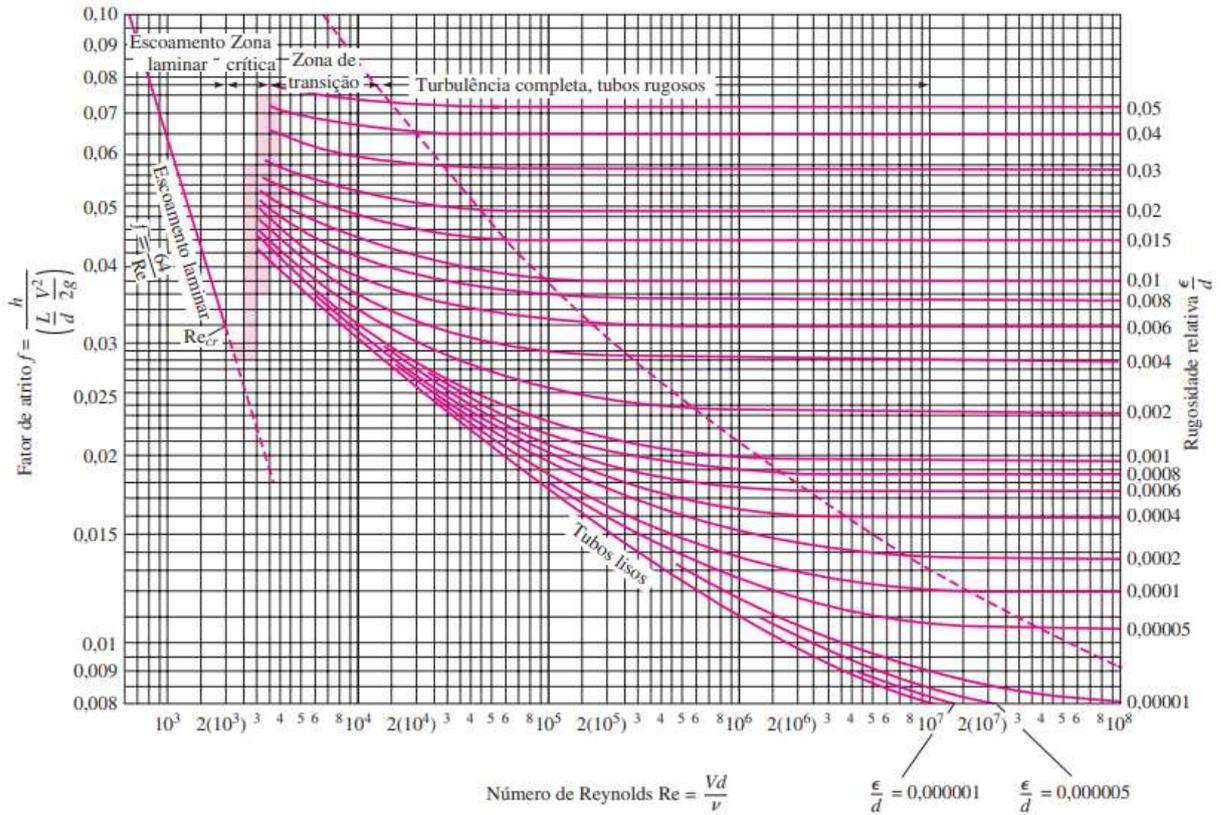
$$h_f = f \frac{L \bar{V}^2}{d \cdot 2} \quad (19)$$

onde  $f$  é o fator de atrito, podendo ser determinado a partir da Equação (20), para o escoamento laminar, e da Equação (21), para o escoamento turbulento, por exemplo.

$$f = \frac{64}{Re} = \frac{64\mu}{\rho d \bar{V}} \quad (20)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{e}{3,7d} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (21)$$

onde  $\frac{e}{d}$  é a rugosidade relativa do tubo, que pode ser utilizada para determinar o fator de atrito a partir do diagrama de Moody, apresentado na Figura 5.



**Figura 5.** Diagrama de Moody.

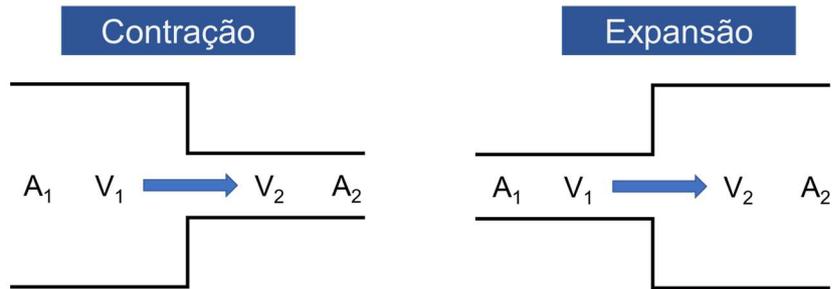
Fonte: White (2011).

Com relação às perdas localizadas decorrentes da contração e expansão da coluna de perfuração, as Equações (22) e (23) podem ser utilizadas, respectivamente.

$$h_c = K_c \frac{\bar{V}_2^2}{2} \quad (22)$$

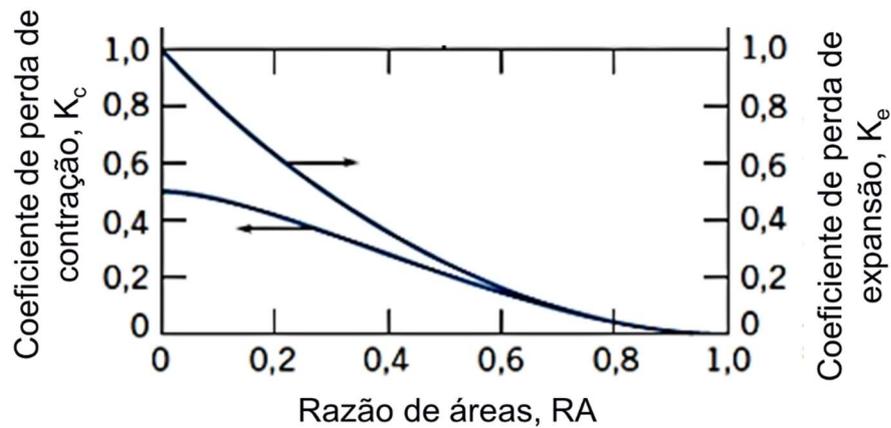
$$h_e = K_e \frac{\bar{V}_1^2}{2} \quad (23)$$

Onde  $\bar{V}_2$  é a velocidade média após a contração e  $\bar{V}_1$  é a velocidade média antes da expansão, como pode ser visto na Figura 6, e  $K_c$  e  $K_e$  são os coeficientes de contração e expansão, respectivamente, sendo determinados usando o gráfico apresentado na Figura 7.



**Figura 6.** Contração e expansão súbita da área de um tubo.

Fonte: Adaptado de Fox, Mcdonald e Pritchard (2014).



**Figura 7.** Coeficientes de perda para escoamento através de mudança súbita de área.

Fonte: Adaptado de Fox, Mcdonald e Pritchard (2014).

A razão de área (RA) necessária para determinar os coeficientes na Figura 7 é calculada pela divisão da área menor pela área maior.

## 2.4. Potência hidráulica da bomba

Energia é a capacidade de realizar trabalho, podendo ser transmitida ou transformada de uma forma para outra. Um exemplo é a transformação de energia elétrica para energia mecânica por um motor. Em fluidos de perfuração, a energia é chamada de energia hidráulica ou, mais comumente, de potência hidráulica (WAMSLEY JR. e FORD, 2006). A Equação (24) representa a equação básica da energia hidráulica.

$$H = \frac{pq}{1714} \tag{24}$$

onde  $H$  é a potência hidráulica em *horsepower*,  $p$  é a pressão em psi,  $q$  é a vazão volumétrica em gal/min e 1714 é o fator de conversão de psi-gal/min para potência hidráulica.

As bombas localizadas na plataforma são as fontes da energia hidráulica transportada pelos fluidos de perfuração. Esta energia é comumente chamada de potência hidráulica total ou potência hidráulica da bomba (WAMSLEY JR. e FORD, 2006), e é representada matematicamente pela Equação (25).

$$H_1 = \frac{p_1 q}{1714} \quad (25)$$

onde  $H_1$  é a energia hidráulica total e  $p_1$  é a pressão de bomba real ou teórica. Note que  $p_1$  é o mesmo que a perda de pressão total ou a perda de pressão do sistema.  $H_1$  é a energia hidráulica total necessária para neutralizar toda a perda de energia por atrito, começando da mangueira do Kelly (linha de superfície) e do Kelly, através da coluna de perfuração e da broca e subindo o anular, com uma determinada vazão volumétrica ( $q$ ) (WAMSLEY JR. e FORD, 2006).

## 2.5. Fluidodinâmica computacional

Fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics – CFD*) é a análise de sistemas de equações diferenciais parciais que envolvem problemas de escoamento de fluidos, transferência de calor e outros processos, com a finalidade de obter soluções numéricas para o cálculo de pressões, velocidade e temperatura através de soluções computacionais (MAITELLI, 2010).

Na fluidodinâmica computacional, as equações diferenciais parciais resultantes das leis de conservação de massa, energia e quantidade de movimento, para cada fase, são discretizadas, sendo obtido um sistema de equações algébricas de mais fácil resolução. Em contraste com a solução analítica ou experimental, a solução gerada é a descrição numérica do escoamento, sendo válida enquanto modelos físicos e condições de contorno forem válidas (FERZIGER e PERIC, 2002).

Assim, o ponto inicial de qualquer método numérico é a escolha do modelo matemático a ser utilizado, ou seja, o conjunto de equações diferenciais parciais e as condições de contorno, por exemplo. O segundo passo seria a escolha do método de

discretização apropriado. Existem diversas abordagens, entretanto as mais utilizadas são: o Método das Diferenças Finitas (MDF), o Método dos Volumes Finitos (MVF) e o Método dos Elementos Finitos (MEF) (FERZIGER e PERIC, 2002).

As vantagens da técnica de CFD incluem, por exemplo, a inexistência de riscos quanto à realização experimental em condições de alta temperatura e pressão, custos reduzidos quando a montagem de modelos reais se torna muito cara ou de difícil elaboração, oferece mais detalhes do que experimentos reais, entre outras (ALVES *apud* BICALHO 2015).

### *2.5.1. Métodos numéricos*

Os métodos numéricos mais comuns para a discretização das equações diferenciais parciais ou ordinárias são o Método das Diferenças Finitas (MDF), o Método dos Elementos Finitos (MEF) e o Método dos Volumes Finitos (MVF).

O MDF é considerado como o mais antigo a usar expansões de séries de Taylor para gerar expressões de diferenças finitas apropriadas com a finalidade de aproximar as derivadas parciais das equações governantes. Essas derivadas são substituídas por aproximações de diferenças finitas para gerar uma equação algébrica para a solução do escoamento em cada ponto da malha. Este método é mais apropriado para malhas estruturadas, pois necessita de um alto grau de regularidade (TU, YEOH e LIU, 2018).

O MEF foi inicialmente desenvolvido como um procedimento específico com o objetivo de determinar soluções para o deslocamento da tensão e da deformação em análises estruturais (TU, YEOH e LIU, 2018). O recurso que pode ser destacado neste método é que as equações são multiplicadas por uma 'função-peso' antes de serem integradas em todo domínio. No MEF mais simples, a solução é aproximada por uma função linear dentro de cada elemento, de uma forma que garanta a continuidade da solução através dos limites dos elementos (FERZIGER e PERIC, 2002). A atração pelo MEF em detrimento do MDF é a capacidade de lidar com geometrias (e limites) complicadas com relativa facilidade (TU, YEOH e LIU, 2018).

O MVF foi derivado do MEF e se utiliza da divisão do domínio em pequenas parcelas, as quais quanto menores forem, mais precisos os resultados obtidos (NEVES; BEZERRA, 2013). No MVF as equações aproximadas são obtidas através

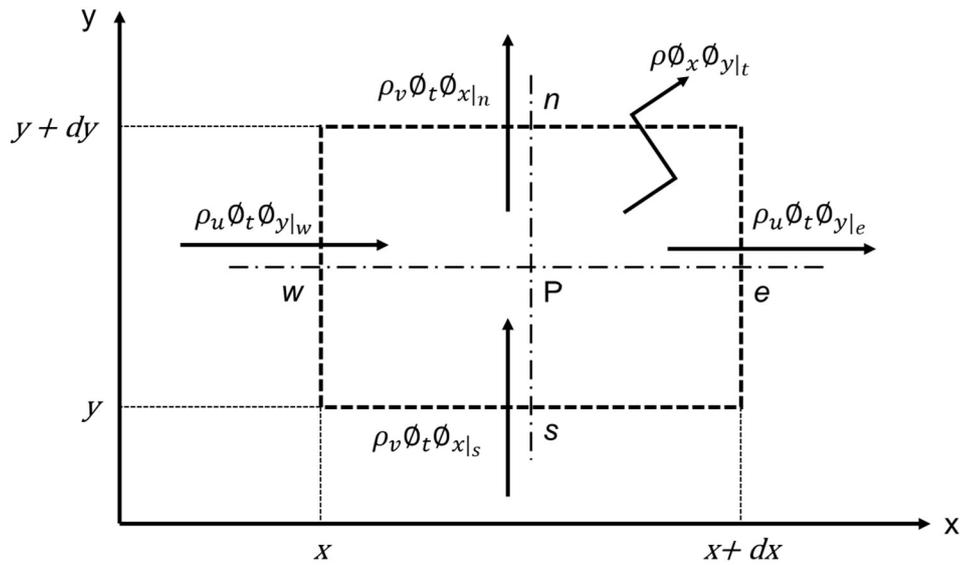
do balanço das propriedades no volume de controle elementar, o que garante a conservação das propriedades em nível de volume de controle e dá um significado físico a cada termo das equações discretizadas (SOUZA, 2000).

Em muitos aspectos, o MVF é bastante semelhante ao MEF, pois ambos são adequados para domínios computacionais irregulares, o que significa que eles podem acomodar geometrias complexas (TU, YEOH e LIU, 2018). Além disso, este método também se assemelha ao MDF, pois em diversos casos, as equações discretizadas obtidas para ambos os métodos são iguais. Entretanto, a base de formulação para cada um é distinta. Enquanto para o MDF a dedução é puramente matemática, a formulação do MVF tem base física (PINTO e LAGE, 1997).

#### 2.5.1.1. *Método dos Volumes Finitos (MVF)*

O MVF aplica as leis de conservação nos volumes de controle que constituem o domínio computacional no geral. Basicamente é apenas uma extensão dos conceitos básicos de conservação. Por exemplo, em mecânica, o diagrama de corpo livre é a base de todas as análises. Esse diagrama nada mais é do que um volume de controle fechado no qual é aplicada a conservação de momento (balanço de forças). Similarmente, em termodinâmica, as leis de conservação de massa e energia são aplicadas em volumes de controle representando dispositivos como bombas, turbinas e *nozzles*. Se um único volume de controle for dividido (discretizado) em diversos volumes de controle de tamanho menor, e as mesmas leis de conservação forem aplicadas a todos os volumes de controle menores, o resultado é um conjunto de equações algébricas acopladas que podem ser solucionadas convenientemente em um computador, e o método resultante é o chamado Método dos Volumes Finitos. As equações algébricas são acopladas porque os volumes de controle adjacentes se comunicam entre si através da troca de massa, momento ou energia (MAZUMDER, 2016).

Na Figura 8 tem-se a representação de um volume finito do domínio bidimensional usado para a demonstração da equação da continuidade em duas dimensões.



**Figura 8.** Balanço de massa em um volume finito.

Fonte: Adaptado de Pinto e Lage, 1997.

A variação de massa dentro deste volume, no intervalo  $\phi_t$  é dada por (PINTO e LAGE, 1997):

$$(\rho\phi x\phi y)_{t+\phi_t} - (\rho\phi x\phi y)_t = (\rho u\phi t\phi y)_w - (\rho u\phi t\phi y)_e + (\rho v\phi t\phi x)_s - (\rho v\phi t\phi x)_n \quad (26)$$

Dividindo-se a Equação (26) por  $\phi_t$ ,  $\phi_x$  e  $\phi_y$ , e rearranjando, obtém-se a equação discretizada para o volume finito em questão:

$$\frac{\rho_{t+\phi_t} - \rho_t}{\phi_t} + \frac{(\rho u)_e - (\rho u)_w}{\phi_x} + \frac{(\rho v)_n - (\rho v)_s}{\phi_y} = 0 \quad (27)$$

A Equação (26) também pode ser obtida a partir da integração da Equação (28), considerando o operador integral representado da Equação (29).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0 \quad (28)$$

$$t + \phi_t \equiv t \quad dt \quad e \equiv w \quad dx \quad n \equiv s \quad dy \quad (29)$$

Dessa forma, é possível observar que no MVF a equação diferencial é aplicada aos subdomínios de uma malha através da sua integração em cada volume, enquanto no MDF, a equação diferencial é aplicada em pontos discretos da malha e são utilizadas aproximações das derivadas a partir de séries de Taylor (PINTO e LAGE, 1997).

A interpretação física direta das equações resultantes da aplicação do método de volumes finitos, bem como a possibilidade de aplicá-lo diretamente sobre as malhas com espaçamentos não-uniformes, são duas das razões que explicam sua popularidade (FORTUNA, 2000).

### 2.5.2. Tipos de malha

De acordo com Elger *et al.* (2013), existem três métodos distintos para a geração de malhas computacionais, sendo eles:

- O **método da malha estruturada**, no qual a malha é gerada com um padrão regular e repetitivo, chamado de bloco, e os detalhes, como os parâmetros de refinamento, são especificados pelo usuário. Uma vantagem alcançada na utilização de uma malha estruturada é que o usuário pode configurar a mesma para maximizar a precisão ao mesmo em que se alcança um tempo de processo aceitável. Uma desvantagem é o tempo para configurar os parâmetros necessários, como também a necessidade de experiência por parte do usuário para a geração de uma malha que funcione de forma adequada.
- O **método da malha não-estruturada**, no qual uma malha não-estruturada é gerada através da utilização de um algoritmo computacional, seleciona uma coleção arbitrária de elementos para preencher o domínio da solução que não formam um padrão. Este método é apropriado para usuários iniciantes, pois a configuração da malha é feita de forma fácil e rápida. A desvantagem é que a malha pode não ser tão boa quanto a estruturada em termos de precisão e tempo de processo.
- O **método da malha híbrida**, no qual as malhas são configuradas para aproveitar os aspectos positivos das malhas estruturadas e não-estruturadas, utiliza malhas estruturadas em regiões específicas, enquanto uma malha não-estruturada é utilizada na maior parte do domínio. Todavia, esse tipo de malha

apresenta algumas desvantagens, como a dificuldade de convergência e em muitas situações não representam de forma adequada a física do problema, tendo que ajustar os métodos numéricos para resolução dos sistemas de equações, fatores de relaxação, interpolação etc.

## 2.6. Estado da arte

As aplicações da técnica CFD vão da engenharia biomédica, metalurgia, automobilística, aeroespacial, esportes, geração de energia, engenharia civil e ambiental até processos químicos e minerais (MALISKA, 1995). Existem muitas pesquisas voltadas para a indústria de óleo e gás utilizando a CFD, como, por exemplo, nas áreas de fluxos multifásicos em reservatórios e dutos, fluxo através de bombas, modelagem de trocadores de calor do tipo casco tubo, design de aquecedor por combustão, estudo da coalescência de gotículas de água, entre outros (MARTINS, 2016). Também existem diversos trabalhos que analisam a influência de diversos fatores na perda de carga em tubulações e poços de petróleo através da CFD, como Ghosh, Das e Das (2010), Tripathi *et al.* (2015), Epelle e Gerogiorgis (2017), Dehkordi *et al.* (2017), Dehkordi, Azdarpour e Mohammadian (2018), Kiran, Ahmed e Salehi (2020) e Ershadnia *et al.* (2020).

Sorgun e Ozbayoglu (2011) estimaram a perda de carga por atrito e o perfil de velocidade de fluidos de perfuração não-Newtonianos em anulares horizontais concêntricos e excêntricos utilizando um modelo Euleriano-Euleriano através da fluidodinâmica computacional. Os resultados numéricos foram comparados com resultados experimentais obtidos em um *flow-loop* METU-PETE. O *software* utilizado para as simulações foi o ANSYS CFX®. Os autores constataram que o modelo numérico foi capaz de prever a perda de carga com um erro menor do que 10%, na maioria dos casos.

Erge *et al.* (2015) conduziram uma análise do escoamento de fluidos de perfuração não-Newtonianos (modelo de Herschel-Bulkley) no anular de um poço. Para isso, foi utilizado o aplicativo computacional ANSYS CFX® e os resultados foram comparados com dados experimentais obtidos em um *flow-loop* horizontal. O objetivo era determinar a perda de carga em função da excentricidade e da rotação da coluna de perfuração. Os autores perceberam uma redução significativa na perda de carga

quando a coluna estava completamente excêntrica, em comparação com a coluna concêntrica. Perceberam também um aumento na perda de carga quando a coluna, excêntrica, era rotacionada.

Saeid e Busahmin (2016) investigaram o escoamento laminar de um fluido de perfuração não-Newtoniano em um poço vertical. O objetivo do estudo foi otimizar a geometria e as condições operacionais relacionadas a perda de carga. O *software* utilizado foi o ANSYS FLUENT® e os parâmetros considerados foram a excentricidade e a velocidade de rotação da coluna e o número de *jet nozzles* presentes na broca. Os resultados mostraram que a perda de carga diminuiu com o aumento do número de *nozzles* na broca e com o aumento da velocidade de rotação da coluna. Mostraram também que com o aumento da excentricidade até um valor intermediário e com o aumento do número de Reynolds a perda de carga também aumentou. Entretanto, com o aumento da excentricidade após o valor intermediário, a perda de carga diminuiu.

Os efeitos da rugosidade, da excentricidade e da velocidade de rotação da coluna na perda de carga, em um anular horizontal, foram estudados por Rushd *et al.* (2017). Para isso, foi utilizado um fluido de perfuração caracterizado pelo modelo de Ostwald de Waele escoando em regime turbulento e o pacote computacional ANSYS CFX®. Os autores observaram que o aumento da excentricidade diminui a perda de carga, quando comparado com o anular concêntrico, e que a velocidade de rotação da coluna não exerceu influência significativa. Observaram também que a rugosidade pode aumentar significativamente a perda de carga.

Sayindla *et al.* (2019) analisaram a influência da velocidade de fluxo na perda de carga. Para isso, a geometria utilizada nas simulações foi de um anular com excentricidade de 0,8, diâmetro externo de 100 mm, diâmetro interno de 50 mm e comprimento de 10 m. Os fluidos de perfuração escolhidos pelos autores são de base óleo, com diferentes densidades e viscosidades, que melhor se adequaram ao modelo de Herschel-Bulkley. As condições de contorno adotadas foram: velocidade de 0,4 até 1,2m/s e condição de não-escorregamento nas paredes. As simulações foram feitas no ANSYS FLUENT®. Os resultados computacionais foram comparados com dados experimentais obtidos através de um *flow-loop* horizontal de 10 metros de comprimento. Foi observado pelos autores que com o aumento da velocidade, a perda de carga também aumentou e que o fluido com maior densidade e viscosidade

também contribuiu para uma perda de carga maior. Além disso, os resultados de simulação apresentaram uma boa correlação com os resultados obtidos em *flow-loop*, com menos de 15% de discrepância.

A técnica da CFD e um modelo matemático desenvolvido por Shrivastava e Kar (modelo SK) foram utilizados, e comparados com dados experimentais, por Jothi, Haimanot e Kumar (2019). O objetivo era determinar a precisão do modelo SK em determinar a perda de carga no transporte pneumático e hidráulico de sólidos granulares, e compará-lo com os resultados obtidos numericamente com a CFD. Os resultados de ambos os modelos foram validados a partir de dados experimentais. Os resultados mostraram que a perda de carga determinada pelo modelo SK foi mais precisa do que a obtida numericamente.

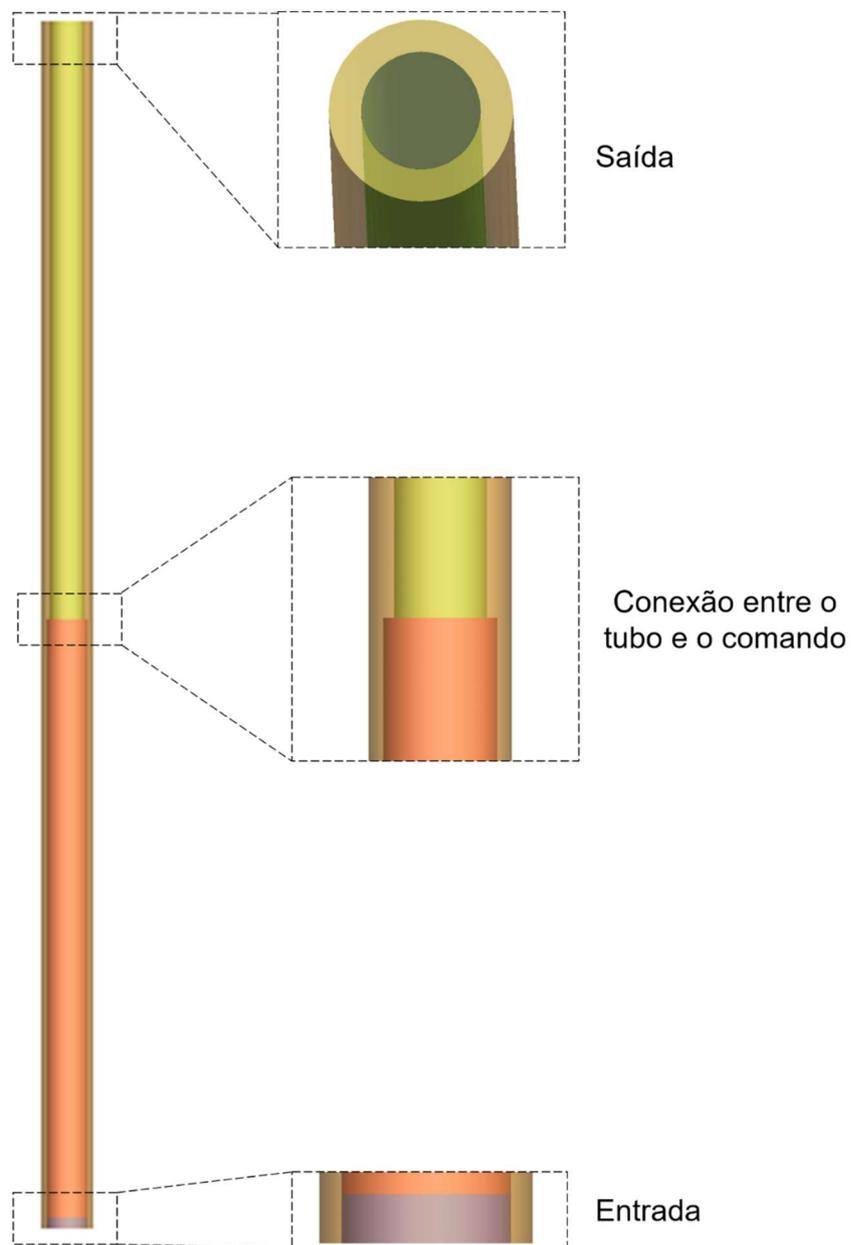
Sultan *et al.* (2019) investigaram os efeitos da velocidade de rotação e da excentricidade da coluna na perda de carga e da velocidade de fluxo nas condições de deposição em um poço horizontal. Para isso, consideraram um anular concêntrico e excêntrico (0-75%), com diâmetro externo de 0,1143m e interno de 0,0635m e comprimento de 5m. O fluido foi considerado newtoniano, possuindo uma concentração de areia entre 5-20% com diâmetro de partícula entre 0,1-0,005mm. As condições de contorno utilizadas foram: velocidade entre 0,2-2,0m/s e rotação da coluna entre 0-150rpm. As simulações foram realizadas no ANSYS FLUENT®. Os autores concluíram que a deposição de sólidos diminuiu com o aumento da taxa de fluxo. Concluíram também que com o aumento da excentricidade da coluna (sem rotação) a perda de carga diminuiu. Já com a rotação da coluna essa tendência foi oposta, com a perda de carga sendo maior para maiores excentricidades.

Gulraiz e Gray (2020) investigaram o efeito da viscosidade obtida a uma taxa de cisalhamento igual a zero (chamada viscosidade *plug*), para um fluido de Herschel-Bulkley, e da vazão na perda de carga em um anular concêntrico. Os autores utilizaram o *software* OpenFOAM® e simularam um escoamento laminar e permanente. Os resultados mostraram que com o aumento da viscosidade *plug*, a perda de carga apresentou um leve aumento e com o aumento da vazão a perda de carga aumenta significativamente.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Formulação do problema

O escoamento foi avaliado no anular de um poço vertical que contém uma coluna de perfuração concêntrica composta de tubos de perfuração e comandos. A geometria, construída no ICFM CFD®, pode ser visualizada na Figura 9, e as dimensões definidas estão apresentadas na Tabela 2.



**Figura 9.** Modelo geométrico utilizado.

**Tabela 2.** Dimensões do modelo geométrico.

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Comprimento da coluna</b>                  | 5 m       |
| <b>Comprimento de entrada</b>                 | 0,05 m    |
| <b>Diâmetro de entrada</b>                    | 0,17145 m |
| <b>Diâmetro do poço</b>                       | 0,2159 m  |
| <b>Diâmetro externo do tubo de perfuração</b> | 0,1397 m  |
| <b>Diâmetro externo do comando</b>            | 0,17145 m |

As emulsões inversas utilizadas para as simulações, retiradas de Costa (2019), são constituídas principalmente de olefina (fase contínua) e de salmoura de cloreto de sódio (fase dispersa). Além disso, Costa (2019) verificou que todas seguem o modelo de Ostwald-de Waele, ou modelo da potência, representado pela Equação (13).

As propriedades das emulsões, necessárias ao modelo numérico, podem ser visualizadas na Tabela 3. As emulsões foram nomeadas em códigos, onde o E representa a emulsão, o A, o C e o R representam a argila, o carbonato de cálcio e a areia, respectivamente, e os números, a concentração dos sólidos em volume.

Os sólidos foram acrescentados após a retirada do volume correspondente (de uma alíquota total de 350 mL) ao volume de sólidos a ser adicionado (5, 10 e 15%) (COSTA, 2019).

O escoamento do fluido foi analisado no regime permanente e laminar e as simulações foram realizadas no pacote computacional ANSYS CFX® 15.0, o qual utiliza o MVF baseado em elementos finitos como método numérico. Este método possui a capacidade de trabalhar facilmente com geometrias arbitrárias, podendo ser aplicado em malhas estruturadas e não-estruturadas (TU, YEOH e LIU, 2018). A máquina utilizada para as simulações foi o *laptop* Dell® Inspiron 3442, com processador Intel® Core™ i5. As simulações levaram, em média, 3 horas para concluir.

**Tabela 3.** Propriedades das emulsões utilizadas nas simulações.  
Dados retirados de Costa (2019).

| Sólido              | Código | Porcentagem de sólidos | Densidade (kg/m <sup>3</sup> ) | Parâmetros do modelo de Ostwald-de-Waele |      |
|---------------------|--------|------------------------|--------------------------------|--|------|
|                     |        |                        |                                | K (Pa.s)                                 | n    |
| -                   | E0     | -                      | 958,6<br>(8,0 lb/gal)          | 0,779<br>(779 cP)                        | 0,35 |
| Argila              | EA05   | 5%                     | 1030,5<br>(8,6 lb/gal)         | 2,076<br>(2076 cP)                       | 0,34 |
|                     | EA10   | 10%                    | 1102,4<br>(9,2 lb/gal)         | 2,519<br>(2519 cP)                       | 0,36 |
|                     | EA15   | 15%                    | 1186,3<br>(9,9 lb/gal)         | 3,125<br>(3125 cP)                       | 0,40 |
| Carbonato de cálcio | EC05   | 5%                     | 1054,5<br>(8,8 lb/gal)         | 1,245<br>(1245 cP)                       | 0,36 |
|                     | EC10   | 10%                    | 1138,3<br>(9,5 lb/gal)         | 1,396<br>(1396 cP)                       | 0,36 |
|                     | EC15   | 15%                    | 1246,2<br>(10,4 lb/gal)        | 1,905<br>(1905 cP)                       | 0,36 |
| Areia               | ER05   | 5%                     | 1006,5<br>(8,4 lb/gal)         | 1,019<br>(1019 cP)                       | 0,35 |
|                     | ER10   | 10%                    | 1054,5<br>(8,8 lb/gal)         | 1,068<br>(1068 cP)                       | 0,36 |
|                     | ER15   | 15%                    | 1114,4<br>(9,3 lb/gal)         | 1,282<br>(1282cP)                        | 0,36 |

As condições de contorno aplicadas estão dispostas na Tabela 4.

**Tabela 4.** Condições de contorno aplicadas ao modelo numérico

|                |                              |
|----------------|------------------------------|
| <b>Entrada</b> | Velocidade: 0,4 m/s          |
| <b>Saída</b>   | Pressão estática: 1 atm      |
| <b>Parede</b>  | Condição de não-deslizamento |
| <b>RMS</b>     | 10e <sup>-8</sup>            |

Foi avaliada a influência do teor de sólidos no escoamento das emulsões e na perda de carga gerada por cada uma. Para a perda de carga também foi analisado os efeitos das propriedades da emulsão e da variação da vazão volumétrica. Para os resultados de vazão, a velocidade da emulsão na entrada foi variada a uma taxa de 0,2 m/s, entre o intervalo de 0,2 e 1,0 m/s. Neste estudo não foi considerado o escoamento no interior da coluna de perfuração, nem a rotação da mesma. Foram determinadas as perdas distribuídas e as localizadas, devido à mudança de diâmetro da coluna de perfuração.

### 3.2. Modelagem matemática

A modelagem matemática aplicada na simulação foi baseada nas equações de conservação: a de massa e de movimento, para o escoamento monofásico, no regime laminar e permanente, expressas pelas Equações (30) e (31), respectivamente. Apesar das emulsões serem sistemas multifásicos, neste trabalho foram consideradas como monofásicos, sendo utilizadas diretamente as propriedades da mistura (densidade, índice de consistência e índice de comportamento) nas condições de contorno.

$$\nabla(\rho \cdot \vec{U}) = 0 \quad (30)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{U} \otimes \vec{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (31)$$

onde  $\vec{U}$  é o vetor velocidade,  $p$  é a pressão,  $S_M$  é o termo que representa as forças externas que atuam sobre o sistema por unidade de volume, e  $\tau$  é o tensor de tensão que está relacionado com a taxa de deformação como:

$$\tau = \mu \left( \nabla \vec{U} + (\nabla \vec{U})^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot \vec{U} \right) \quad (32)$$

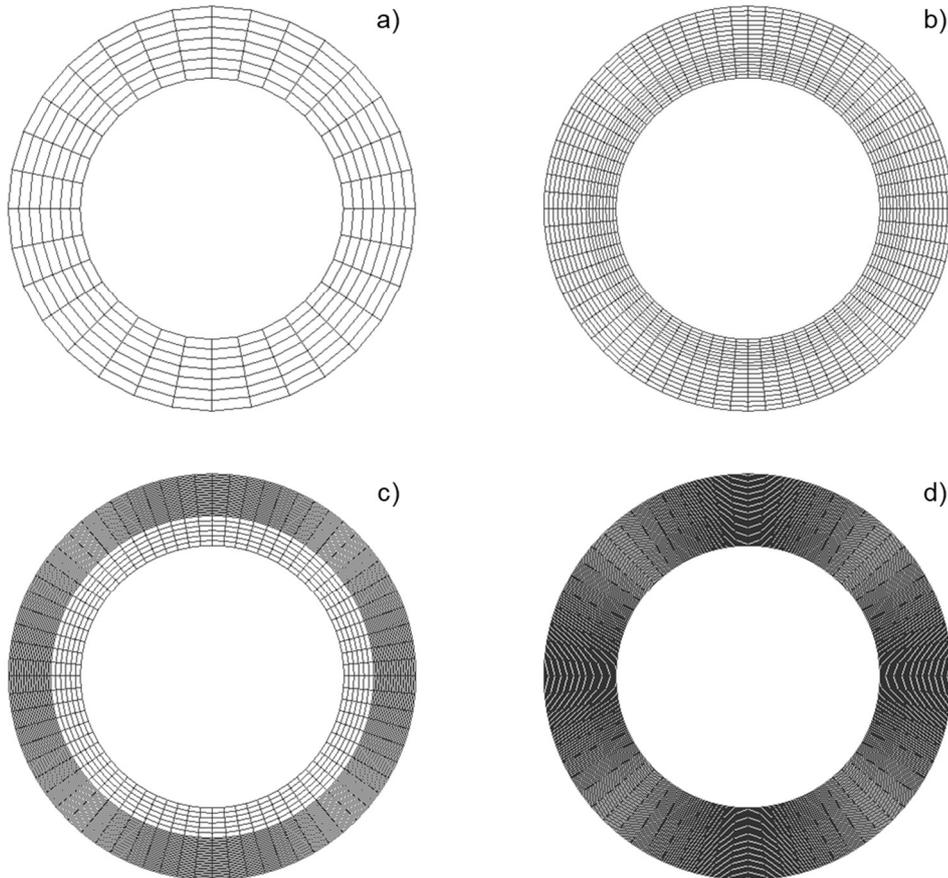
### 3.3. Validação da malha

Para se obter um resultado o mais próximo do real possível, se faz necessário o refinamento da malha numérica a ser utilizada. Para o refinamento também deve ser levado em consideração o tempo de processo: quanto mais fina a malha, maior será o tempo necessário para a obtenção da solução (SANSONI JÚNIOR, 2005).

Para este estudo foram criadas, no ICEM CFD®, quatro malhas hexaédricas e estruturadas com números de nós e elementos apresentados na Tabela 5. Detalhes das malhas geradas na região de saída, para cada caso, podem ser visualizadas na Figura 10.

**Tabela 5.** Características das malhas estudadas.

|                | Nº de nós | Nº de elementos |
|----------------|-----------|-----------------|
| <b>Malha 1</b> | 21.280    | 17.760          |
| <b>Malha 2</b> | 198.288   | 214.560         |
| <b>Malha 3</b> | 290.664   | 302.400         |
| <b>Malha 4</b> | 493.920   | 479.808         |



**Figura 10.** Malhas (a) 1, (b) 2, (c) 3 e (d) 4 geradas na saída do modelo numérico.

Para todas as simulações realizadas nesta etapa, a emulsão sem adição de sólidos (E0) foi escolhida para o escoamento, e tendo como condições de contorno uma velocidade de 0,7m/s na entrada, caracterizando o escoamento laminar, e uma condição de não-deslizamento nas paredes.

### 3.4. Validação do modelo numérico

Com o objetivo de validar o modelo numérico criado e avaliar se ele era capaz de produzir resultados adequados, um teste foi realizado utilizando um modelo newtoniano no escoamento, onde a perda de carga determinada pelo programa foi comparada com a perda de carga analítica, calculada usando a Equação (18).

Para isso, um valor de taxa de cisalhamento foi selecionado e a viscosidade correspondente foi aplicada à simulação. O fluido escolhido para esta etapa foi a emulsão sem sólidos (E0). Esses valores poder ser observados na Tabela 6.

**Tabela 6.** Dados necessários para a validação do modelo numérico.

Fonte: Dados retirados de Costa (2019).

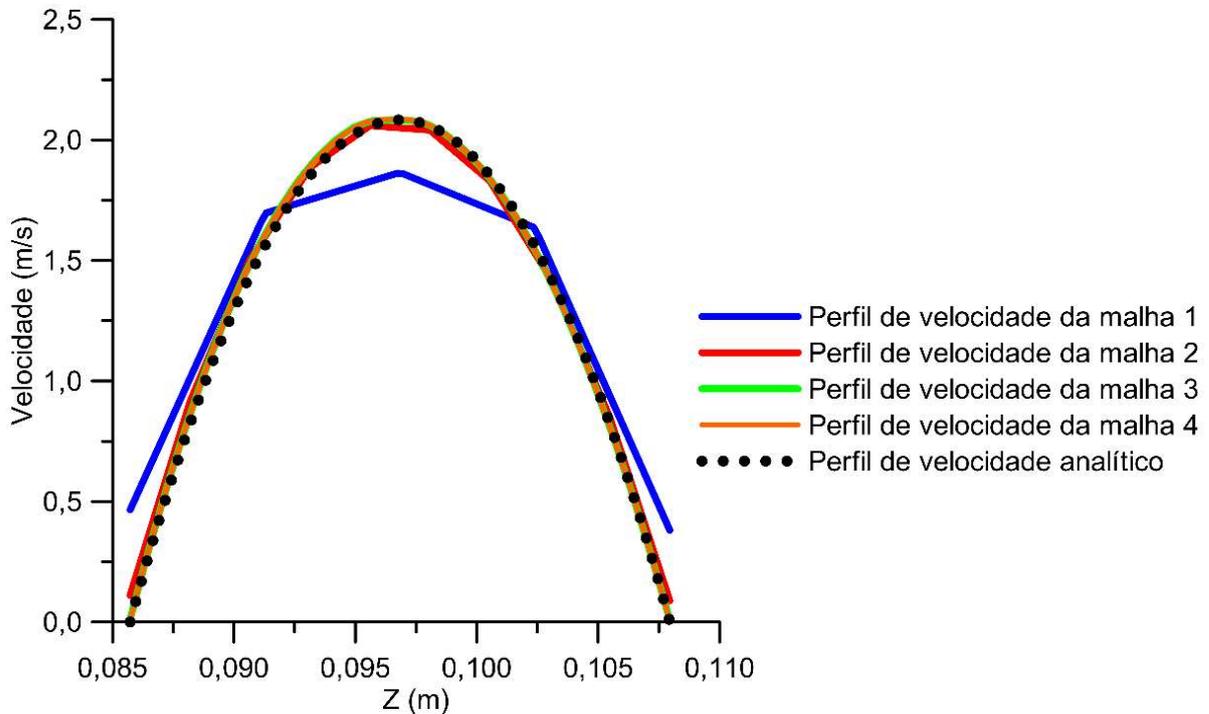
| Emulsão | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $\gamma_m$ (1/s) | $\mu$ (Pa.s)         |
|---------|-----------------------------|------------------|----------------------|
| E0      | 958,7<br>(8,0 lb/gal)       | 15,12            | 0,1267<br>(126,7 cP) |

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Dependência da malha

A validação foi feita baseada em uma comparação entre o perfil de velocidade gerado por cada malha e o perfil de velocidade analítico, determinado a partir da Equação (5). Para esta comparação também foi considerada uma região do anular onde o escoamento estivesse completamente desenvolvido, para evitar os efeitos de entrada hidrodinâmica. Esta região foi determinada baseada no cálculo do comprimento de entrada, usando a Equação (2), e o resultado apresentou um valor de, aproximadamente, 1,9 metros.

Na Figura 11 está representado a comparação entre o perfil de velocidade gerado por cada malha e o perfil de velocidade analítico, determinado a partir da Equação (5).



**Figura 11.** Perfis de velocidade gerados pelas malhas estudadas.

A partir da análise das curvas apresentadas na Figura 11, foi possível observar que a curva gerada pela malha 1 destoa significativamente das demais por não se apresentar exatamente como uma parábola (formato característico do escoamento completamente desenvolvido no regime laminar, como mostrado na Figura 2). Já a curva gerada pela malha 2 apresentou um melhor ajuste à curva analítica, porém percebeu-se que a velocidade nas paredes é maior do que zero, não obedecendo à condição de não-deslizamento estabelecida. Além disso, esta parábola não possui um vértice arredondado. Estes fatores demonstram que as duas malhas (1 e 2) não possuem refinamento suficiente para produzir resultados adequados.

Ainda na Figura 11, a curva gerada pelas malhas 3 e 4 estão sobrepostas e apresentam um excelente ajuste com a curva analítica, mostrando que os resultados obtidos por ambas as malhas são semelhantes e satisfatórios. Assim sendo, a malha 3 foi a escolhida para as simulações subsequentes, com o objetivo de diminuir o tempo de processo, em detrimento da malha 4.

## 4.2. Comparação dos resultados numéricos com os analíticos

Na Tabela 7 estão apresentados os valores de perda de carga determinados analítica e numericamente, e o erro percentual entre eles. Para as duas situações foram adotadas a velocidade na seção de entrada igual a 0,4 m/s.

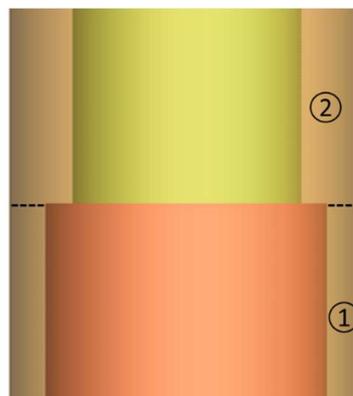
**Tabela 7.** Erro percentual entre os valores de perda de carga numérico e analítico.

| Velocidade (m/s) | Perda de carga ( $m^2/s^2$ ) |           |       |
|------------------|------------------------------|-----------|-------|
|                  | CFX                          | Analítico | Erro  |
| 0,4              | 8,025444                     | 8,00818   | 0,22% |

O erro percentual entre os dois valores foi muito pequeno, indicando que o modelo numérico criado no ANSYS CFX<sup>®</sup> é capaz de prever a perda de carga de forma válida e precisa.

## 4.3. Avaliação do escoamento

Como a coluna de perfuração contém comandos e tubos de perfuração, que possuem diâmetros diferentes, o anular foi dividido em duas regiões: sendo a região 1 correspondente ao espaço entre a parede do poço e o comando, e a região 2, correspondente ao espaço entre a parede do poço e o tubo de perfuração, como mostrado na Figura 12.



**Figura 12.** Regiões do anular

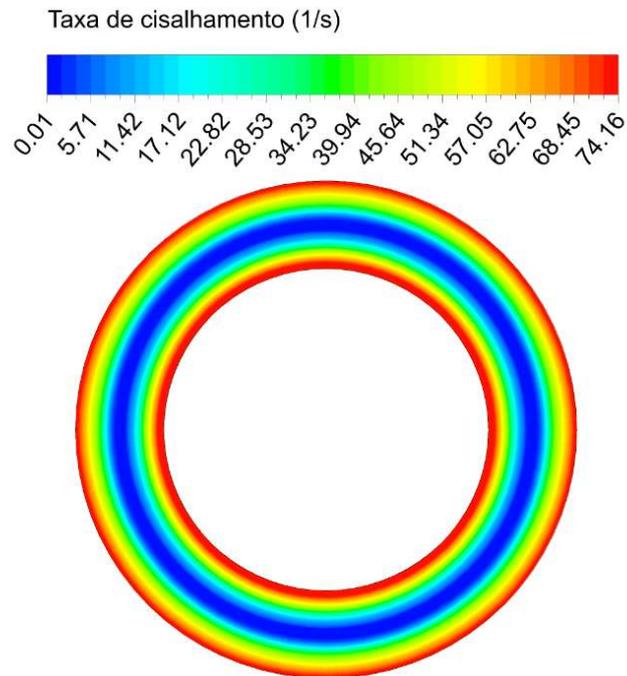
Para verificar se o escoamento permaneceu laminar por todo comprimento do poço, o número de Reynolds foi calculado, através da Equação (16), para cada emulsão, com os resultados apresentados na Tabela 8.

**Tabela 8.** Número de Reynolds para cada emulsão nas duas regiões do anular.

| Emulsão     | Número de Reynolds |          |
|-------------|--------------------|----------|
|             | Região 1           | Região 2 |
| <b>E0</b>   | 936,29             | 560,97   |
| <b>EA05</b> | 370,24             | 219,70   |
| <b>EA10</b> | 274,79             | 166,23   |
| <b>EA15</b> | 179,85             | 113,08   |
| <b>EC05</b> | 555,99             | 336,34   |
| <b>EC10</b> | 495,85             | 299,96   |
| <b>EC15</b> | 363,36             | 219,81   |
| <b>ER05</b> | 715,77             | 428,85   |
| <b>ER10</b> | 648,13             | 392,08   |
| <b>ER15</b> | 539,94             | 326,63   |

Todos os valores obtidos estão bem abaixo do limite máximo atribuído ao escoamento laminar ( $\approx 2300$ ), indicando que, para as emulsões estudadas, a velocidade utilizada na condição de contorno de entrada foi apropriada.

Outro fator importante a ser analisado no escoamento é a taxa de cisalhamento distribuída na seção transversal do anular. O perfil da taxa de cisalhamento para o escoamento completamente desenvolvido, na região 2 do anular, pode ser visualizado na Figura 13. O fluido em questão é a emulsão sem sólidos (E0).

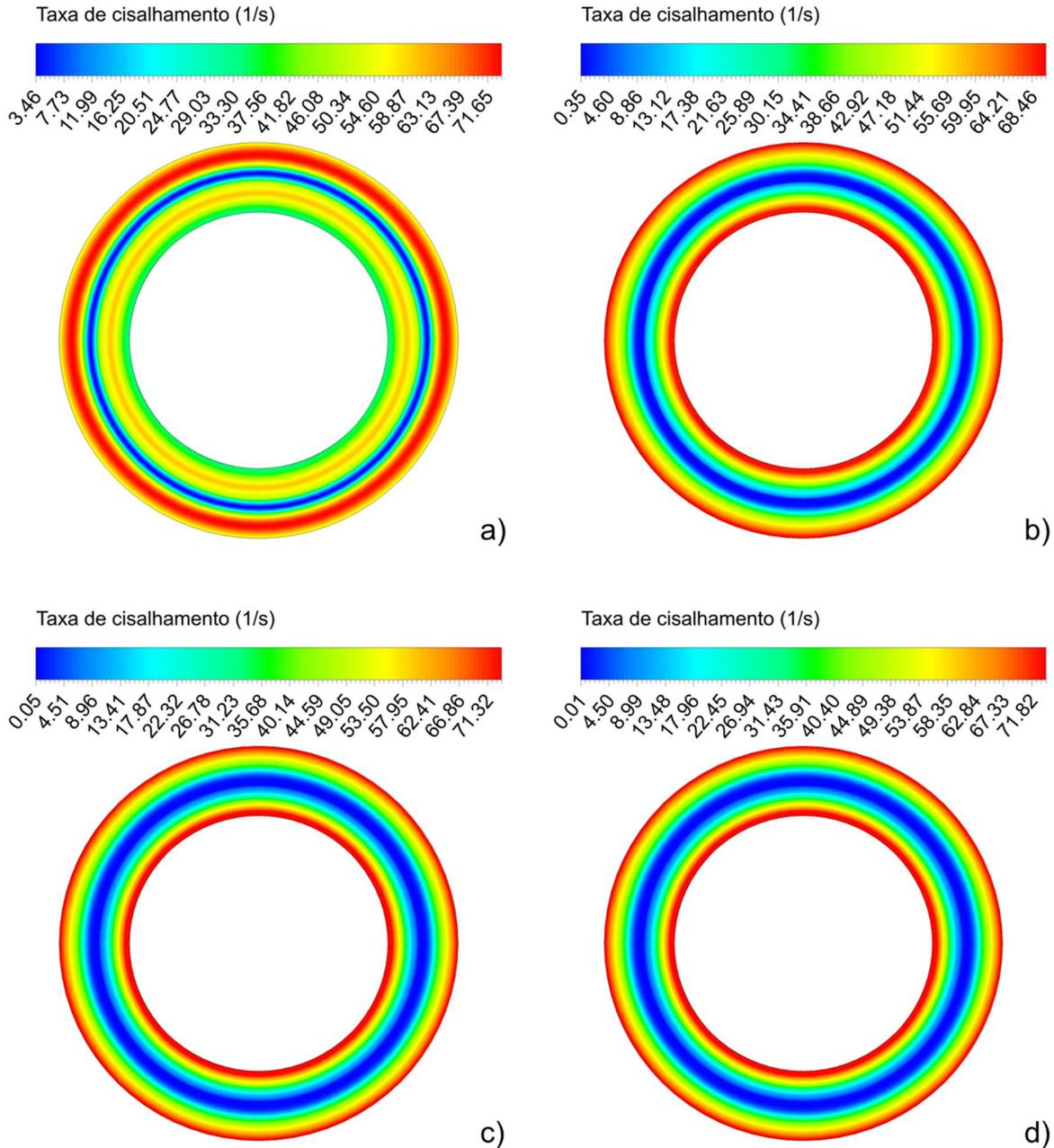


**Figura 13.** Perfil de taxa de cisalhamento na seção transversal para o escoamento completamente desenvolvido na região 2 do anular. (Altura: 4 metros).

A partir da análise da Figura 13, percebe-se que a taxa de cisalhamento tendeu a 0 entre o centro do anel e a parede do tubo de perfuração, onde a velocidade é máxima. E isto ocorreu porque a taxa de cisalhamento nada mais é do que o gradiente de velocidade, ou seja, é a taxa de mudança da velocidade na qual uma camada de fluido ultrapassa uma camada adjacente (KRISHNA *et al.*, 2019). Isto significa que, quando a taxa de cisalhamento se aproxima de zero, a velocidade não mais se altera, permanecendo constante. A partir desse ponto, o escoamento é considerado completamente desenvolvido. Na região de entrada hidrodinâmica da região 2 do anular, entretanto, a taxa de cisalhamento apresentou valores maiores no centro do escoamento, pois a velocidade ainda estava apresentando mudanças. A variação da taxa de cisalhamento, à medida que o escoamento se afasta da região de entrada, pode ser observada na Figura 14.

Na curva (a) da Figura 14 percebe-se que a taxa de cisalhamento próxima à coluna de perfuração (não é tão alta quanto a próxima da parede do poço. Isso ocorreu pois, para uma altura de 2,7m, o escoamento da emulsão E0 ainda estava sob efeito da mudança de diâmetro entre as duas porções do anular. Nas imagens (b) e (c) da Figura 14, a taxa de cisalhamento na região central ainda apresentou um leve

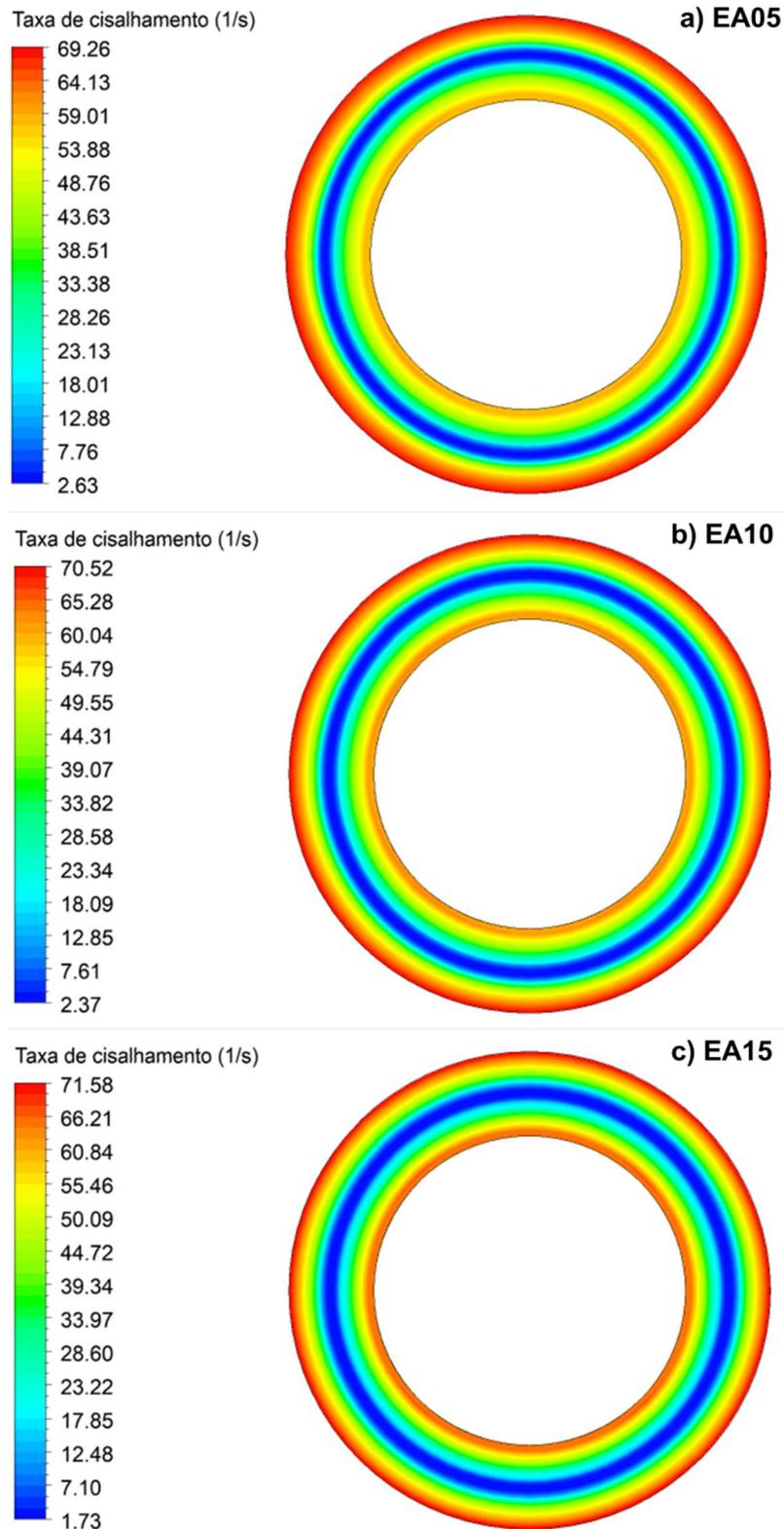
aumento, até chegar em um ponto que não variou mais, como pode ser visto através da comparação dos valores das legendas das Figuras 13 e 14(d).



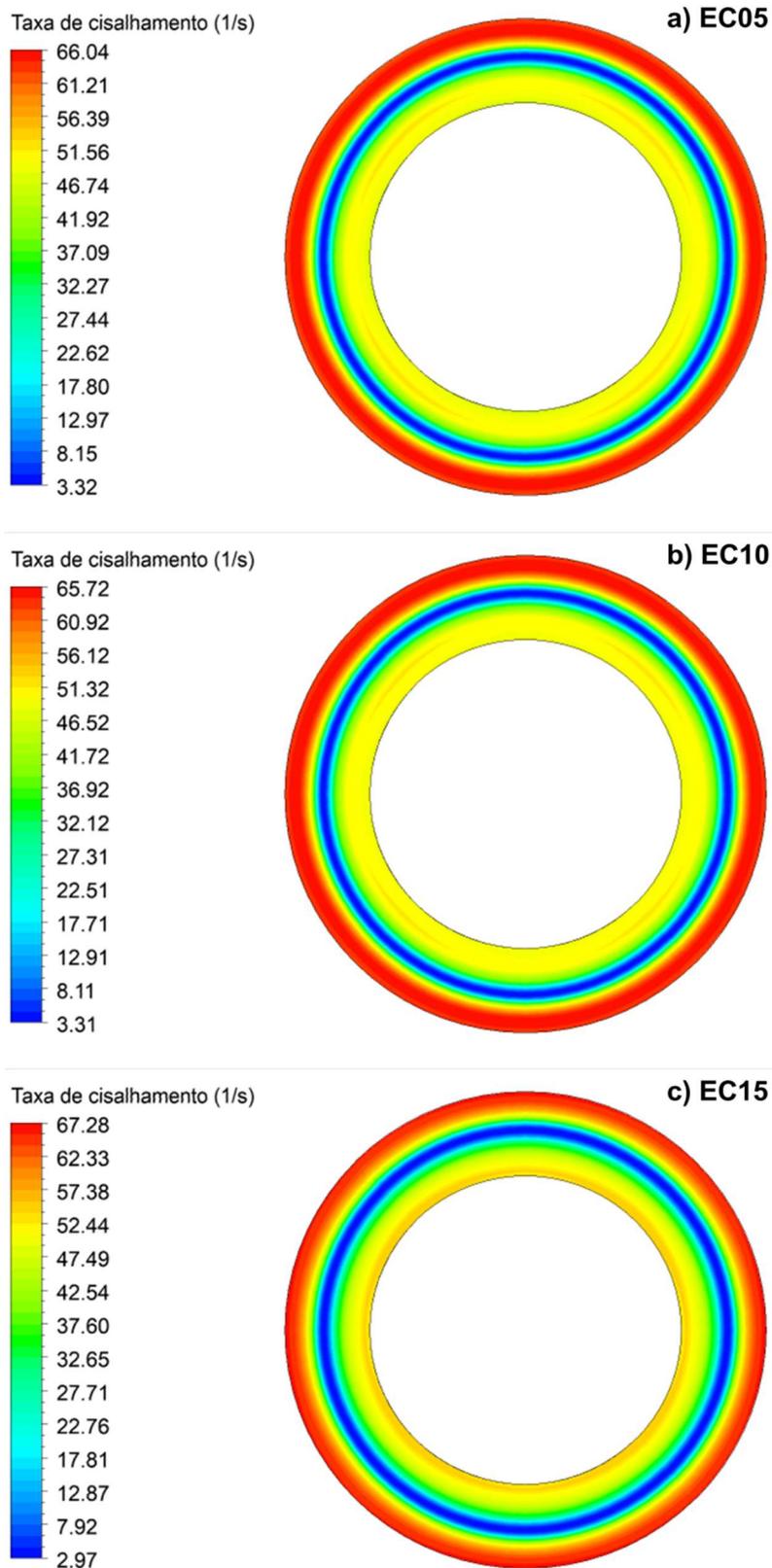
**Figura 14.** Taxa de cisalhamento gerada durante o escoamento da emulsão E0 nas alturas de a) 2,7m, b) 3,0m, c) 3,3m e d) 3,6m do poço (porção 2 do anular).

Para as demais emulsões, a taxa de cisalhamento apresentou diferenças na região de entrada hidrodinâmica de acordo com a viscosidade de cada uma, com valores menores no centro do escoamento para as emulsões mais viscosas, como mostrado nas Figuras 15, 16 e 17. Já na região de escoamento completamente

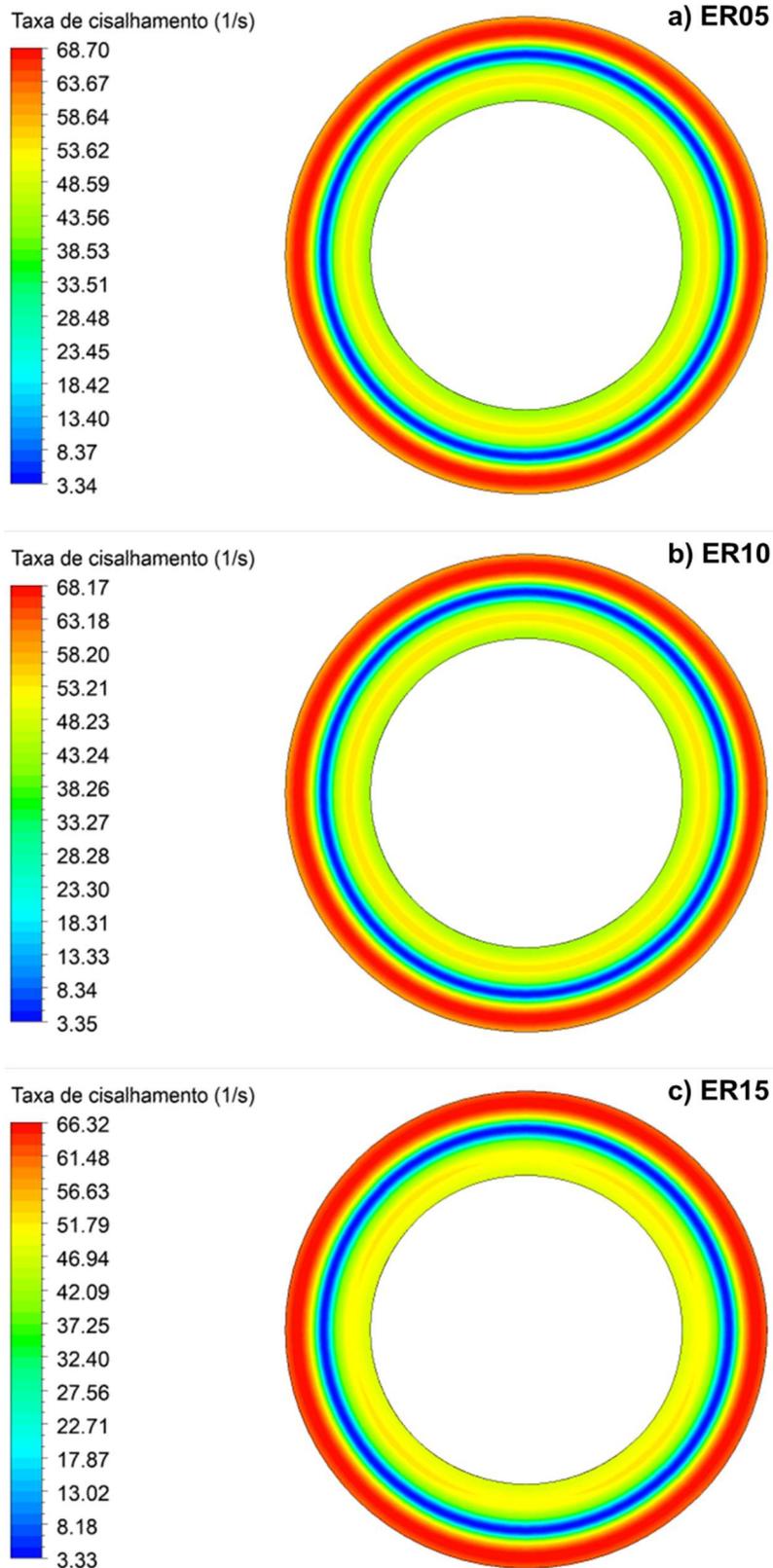
desenvolvido, os perfis de taxa de cisalhamento foram idênticos ao gerado no escoamento da emulsão E0, apresentado nas Figuras 13 e 14(d).



**Figura 15.** Taxa de cisalhamento gerada durante o escoamento das emulsões com teores de a) 5%, b) 10% e c) 15% de argila a uma altura de 2,7m.

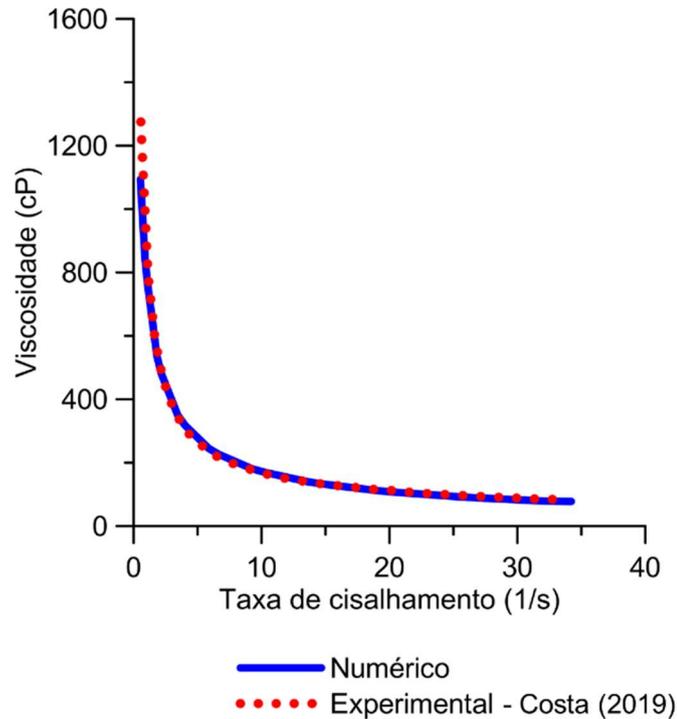


**Figura 16.** Taxa de cisalhamento gerada durante o escoamento das emulsões com teores de a) 5%, b) 10% e c) 15% de carbonato de cálcio a uma altura de 2,7m.



**Figura 17.** Taxa de cisalhamento gerada durante o escoamento das emulsões com teores de a) 5%, b) 10% e c) 15% de areia a uma altura de 2,7m.

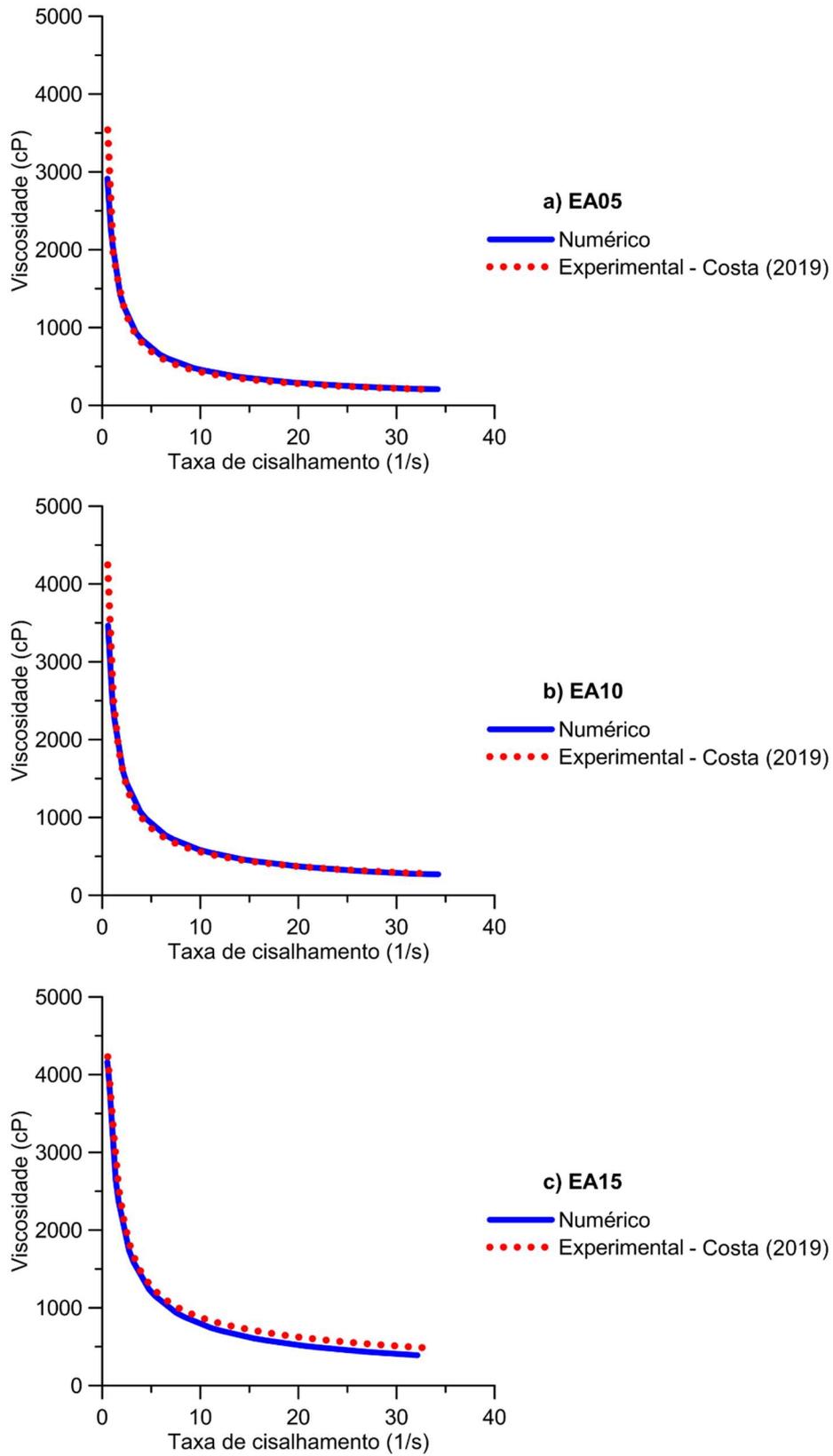
A partir dos valores da taxa de cisalhamento, as curvas de viscosidade foram plotadas e comparadas com as curvas experimentais obtidas por Costa (2019). Na Figura 18, este resultado está apresentado para a emulsão E0.



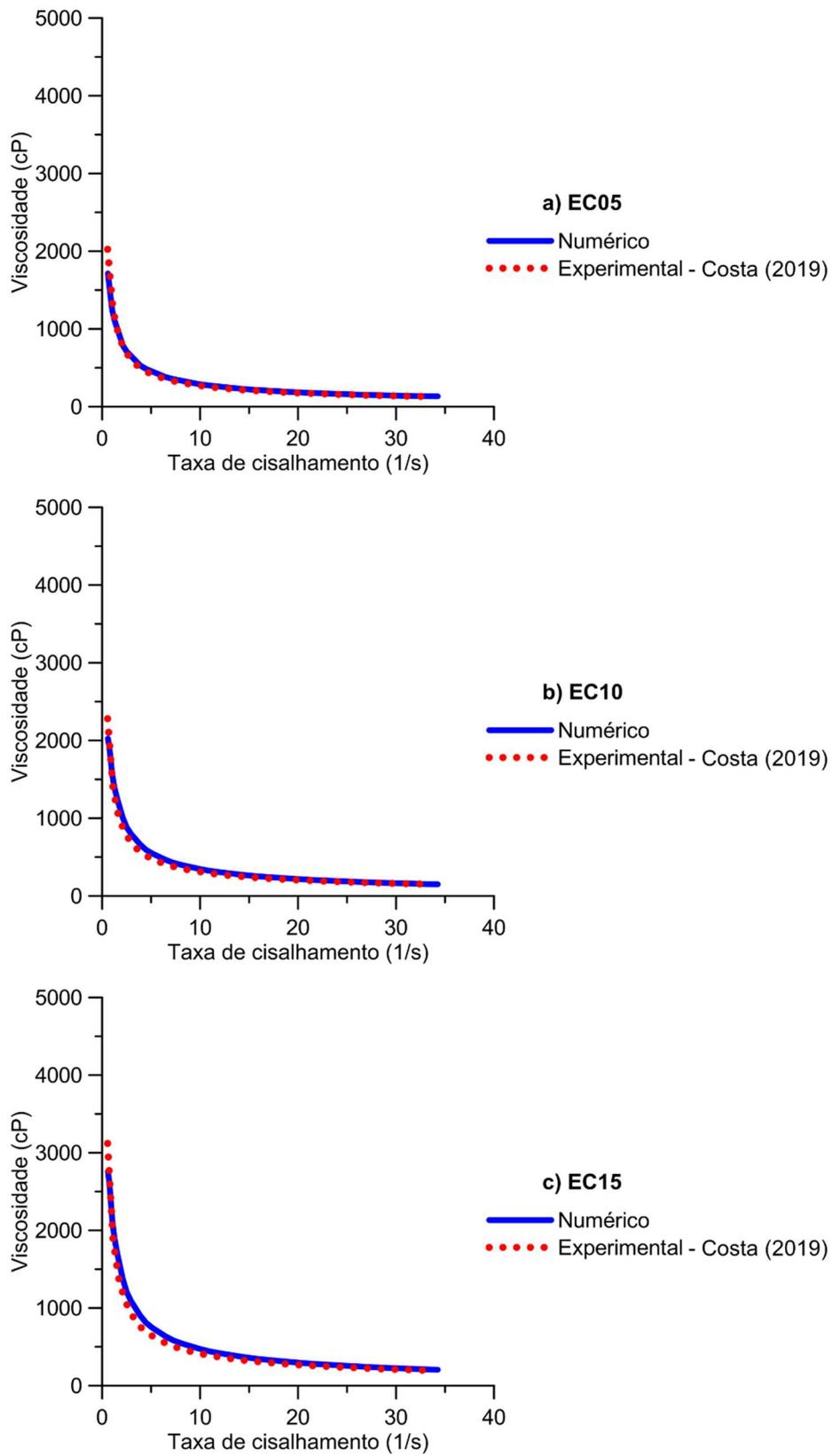
**Figura 18.** Comparação entre as curvas de viscosidade numérica e experimental para a emulsão sem sólidos.

O resultado numérico exibiu uma boa correlação com o experimental, apresentando, apenas, uma diferença significativa nos valores de viscosidade obtidos a baixas taxas de cisalhamento (menores que  $0,65\text{s}^{-1}$ ). Isto pode ter ocorrido por uma variação entre os valores da tensão de cisalhamento resultantes do escoamento numérico e do ensaio realizado no viscosímetro, para os dados experimentais, já que a determinação da viscosidade para uma determinada taxa de cisalhamento também é dependente desta variável, definido pela Equação (11).

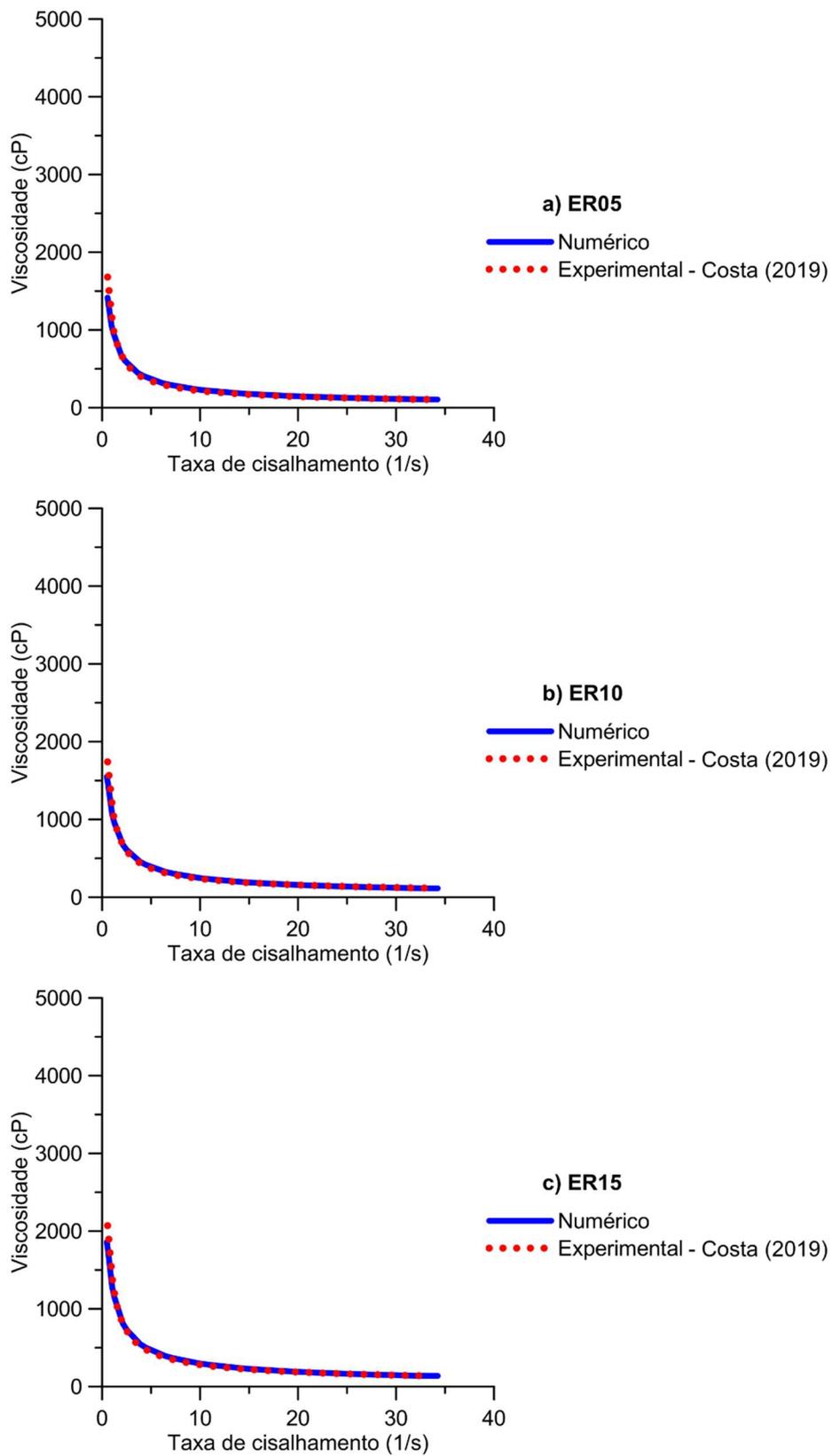
As curvas de viscosidade para as demais emulsões podem ser visualizadas nas Figuras 19, 20 e 21.



**Figura 19.** Curvas de viscosidade numérica e experimental para as emulsões com teores de argila de a) 5%, b) 10% e c) 15%.



**Figura 20.** Curvas de viscosidade numérica e experimental para as emulsões com teores de carbonato de cálcio de a) 5%, b) 10% e c) 15%.

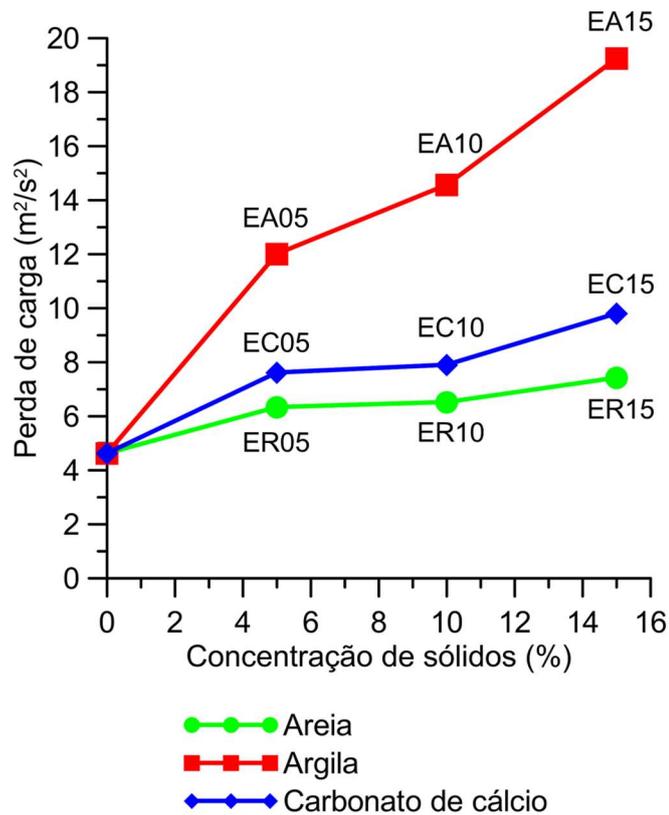


**Figura 21.** Curvas de viscosidade numérica e experimental para as emulsões com teores de areia de a) 5%, b) 10% e c) 15%.

#### 4.4. Perda de carga

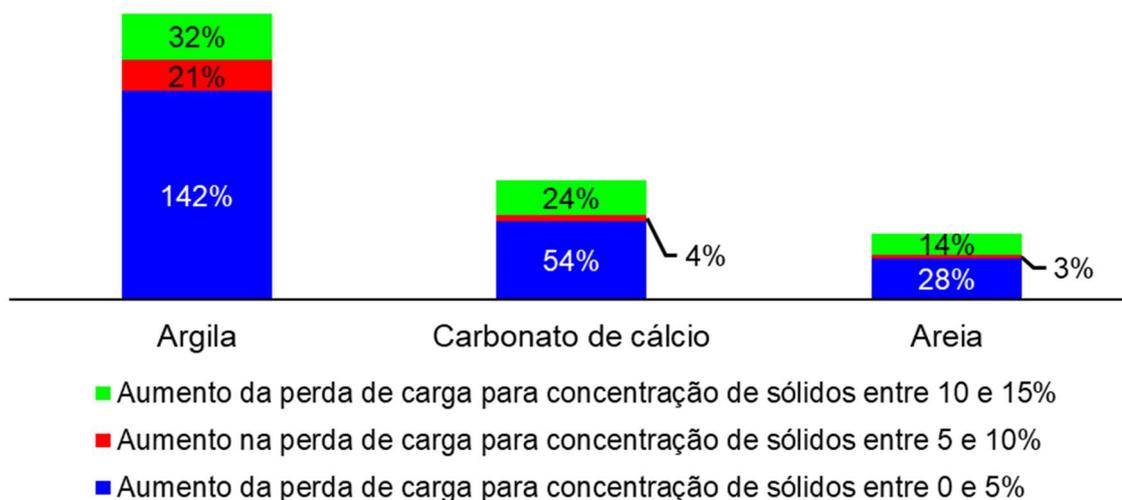
##### 4.4.1. Perda de carga vs. teor de sólidos

Na Figura 22 estão apresentados os resultados da influência do aumento da concentração de sólidos na perda de carga no anular do poço. A perda de carga foi determinada a partir da Equação (18).



**Figura 22.** Relação entre a perda de carga e o aumento da concentração de sólidos nas emulsões.

Como pode ser observado, a perda de carga tende a aumentar com o aumento da concentração, tendo este fenômeno se apresentado muito mais pronunciado quando o sólido em questão é a argila. Esse aumento não segue uma tendência linear com um aumento linear da concentração. O gráfico da Figura 23 apresenta o aumento percentual da perda de carga entre cada concentração de sólidos.



**Figura 23.** Aumento percentual da perda de carga entre cada concentração de sólidos.

É possível perceber que o aumento da perda de carga foi muito maior quando houve a adição inicial de sólidos, com um aumento de 142% para o teor de 5% de argila. Isto pode ter ocorrido devido a mudanças nas propriedades das emulsões em virtude da presença dos sólidos, principalmente nos parâmetros reológicos, como pode ser visto na Tabela 3. Com o acréscimo de 5 para 10% de sólidos, o aumento na perda de carga foi bem menor (se comparado com o aumento inicial), chegando a ser quase inexpressivo para o escoamento quando o carbonato de cálcio e a areia foram incorporados na emulsão. Entretanto, para esses dois casos, com o acréscimo de 10 para 15% de sólidos, a perda de carga voltou a aumentar, com uma diferença significativa em relação a concentração anterior. Para o escoamento das emulsões incorporadas com argila, o aumento da perda de carga foi expressivo para todos os intervalos de concentração, mas também apresentando o aumento mais baixo para o teor de 10%.

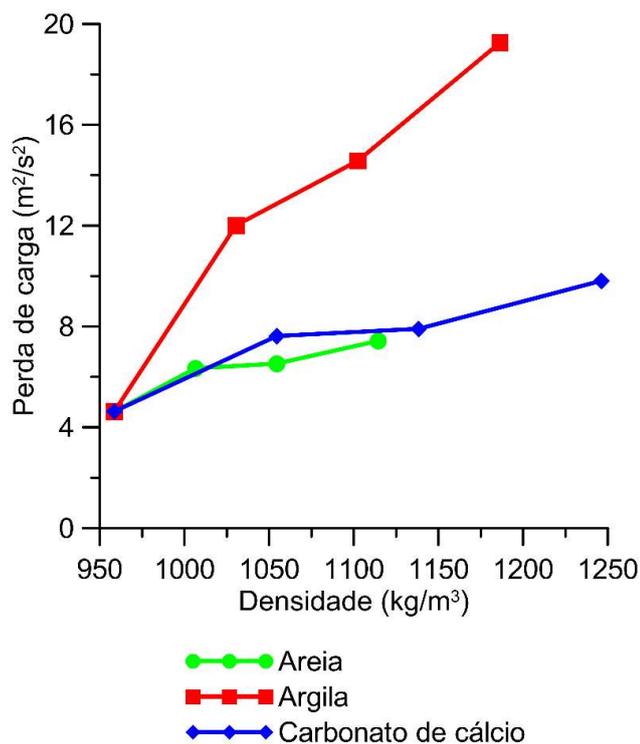
De forma geral, com a adição máxima de sólidos (15%), o aumento da perda de carga foi de 289, 97 e 50% para as emulsões com argila, carbonato de cálcio e areia, respectivamente, quando comparados com a emulsão E0.

O aumento da perda de carga com o aumento da concentração de sólidos também foi verificado por Verma, Singh e Seshadri (2006). Os autores avaliaram a perda de carga em um tubo horizontal com curva de 90° durante o escoamento de uma pasta de cinza volante. A concentração do sólido foi variada entre 50 e 65%, em peso. Os autores constataram que com o aumento da concentração de sólidos, a

perda de carga também aumentou. Para concentrações menores que 60%, no entanto, a perda de carga foi menor do que a observada no escoamento de água.

#### 4.4.2. Perda de carga vs. densidade

A relação entre a densidade das emulsões e a perda de carga está apresentada na Figura 24.



**Figura 24.** Relação entre a perda de carga e a densidade das emulsões.

Analisando as curvas apresentadas, é possível afirmar que, independentemente do tipo de sólido, a perda de carga aumentou com o aumento da densidade das emulsões. Como o aumento da densidade possui uma relação direta com o aumento do teor de sólidos, os resultados apresentados na Figura 22 estão em concordância com os apresentados na Figura 24. Porém, comparando todas as emulsões, percebe-se que maiores valores de densidade não representaram as maiores perdas de carga.

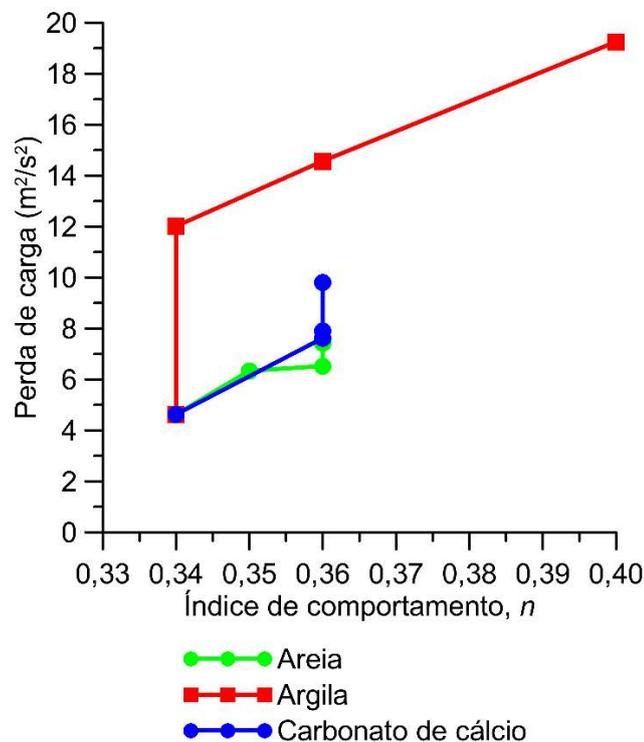
As emulsões incorporadas com carbonato de cálcio apresentaram valores de densidade maiores, porém muito próximos, das emulsões incorporadas com argila, com uma diferença máxima de 0,5 lb/gal entre as emulsões EA15 e EC15. Contudo,

a perda de carga gerada no escoamento da emulsão EA15 foi quase 100% maior do que o gerado pela emulsão EC15. Já as emulsões incorporadas com areia apresentaram os menores valores de densidade, com uma diferença máxima de 1,1 lb/gal entre as emulsões EC15 e a ER15, gerando, no entanto, valores de perda de carga muito próximos aos apresentados pelo escoamento das emulsões com carbonato de cálcio.

Dessa forma, a quantidade de sólidos influencia, de forma mais significativa, na perda de carga ao promover mudanças nos parâmetros reológicos da emulsão, como será mostrado a seguir.

#### 4.4.3. Perda de carga vs. parâmetros reológicos

A Figura 25 apresenta os resultados da relação entre a perda de carga e o índice de comportamento,  $n$ , que representa o grau de afastamento do fluido do modelo Newtoniano. Ou seja, quanto mais próximo de zero o valor de  $n$ , mais distante do comportamento Newtoniano está o fluido.

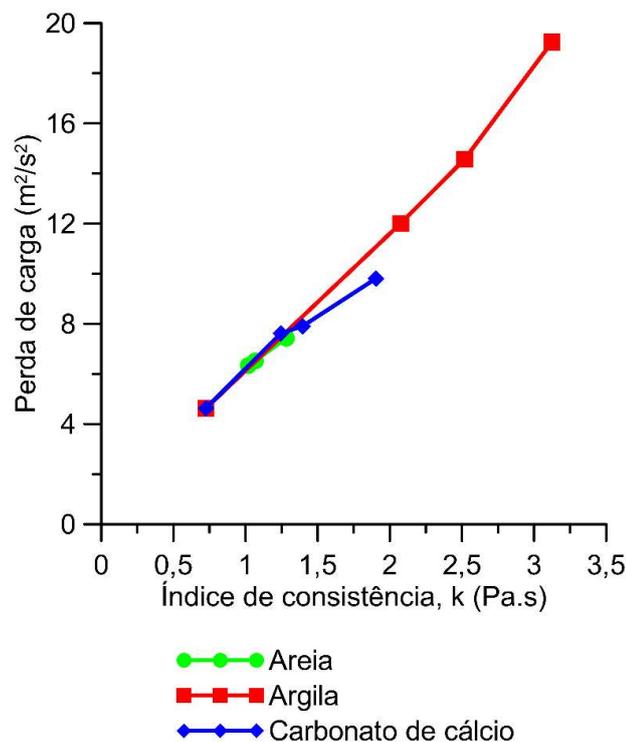


**Figura 25.** Relação entre a perda de carga e o índice de comportamento das emulsões.

Analisando a Figura 25, percebe-se uma certa tendência ao aumento da perda de carga com o aumento do índice de comportamento ( $n$ ) para as emulsões adicionadas de argila. Esse mesmo comportamento foi observado por Ferroudji *et al.* (2019). Os autores avaliaram a perda de carga em função do índice de comportamento dos fluidos de perfuração que seguiam o modelo de Ostwald de Waele. Para isso, variaram os valores de índices de comportamento entre 0,1 e 0,9. As simulações foram realizadas no ANSYS FLUENT®. Como resultado, constataram que à medida que o índice de comportamento do fluido se aproximou de um comportamento newtoniano, ou seja, quando se aproximou de 1,0, a perda de carga aumentou exponencialmente para uma razão de diâmetro constante.

Para as demais emulsões, incorporadas com carbonato de cálcio e areia, mesmo com o aumento da concentração de sólidos, os índices de comportamento não variaram muito, apresentando, até, valores iguais para concentrações diferentes, como é o caso, por exemplo, das emulsões EC05, EC10 e EC15, com o  $n$  igual a 0,36, como pode ser visto na Tabela 3. A perda de carga, para esses casos, não apresentou uma correlação direta com o índice de comportamento.

A relação entre a perda de carga e o índice de consistência das emulsões, que indica a resistência do fluido ao escoamento, pode ser observada na Figura 26.



**Figura 26.** Relação entre a perda de carga e o índice de consistência das emulsões.

É possível observar que o índice de consistência exerce uma influência muito mais significativa na perda de carga do que os parâmetros avaliados anteriormente. Para os maiores valores de  $k$ , foram encontradas as maiores perdas de carga. Segundo Machado (2002), a presença de sólidos pode provocar uma resistência ao escoamento devido ao atrito entre as partículas, e o aumento da concentração de sólidos intensifica esse efeito. Como o índice de consistência,  $k$ , representa a resistência do fluido ao escoamento, logo a presença dos sólidos contribui para seu aumento.

Para este trabalho, como o escoamento foi tratado como monofásico, não houve influência, na perda de carga, do atrito mecânico causado pelo contato das partículas sólidas com a parede do poço ou da coluna de perfuração, apenas do contato do próprio fluido, além do atrito viscoso, gerado pelo aumento do índice de consistência com o aumento do teor de sólidos. De acordo com Fox, McDonald e Pritchard (2014), a perda de carga representa a energia mecânica convertida em energia térmica por efeitos do atrito.

Como relatado anteriormente, no escoamento laminar há um gradiente de velocidade atuando entre a região central do espaço anular e a parede do poço (ou parede da coluna de perfuração), gerando um perfil de velocidade parabólico (Figura 1). Em virtude disto, o escoamento no anular se dividiu em camadas que se moviam com velocidades diferentes, gerando uma força de atrito entre elas. Quanto mais resistente ao escoamento for a emulsão, maior será esse atrito, e, conseqüentemente, maior será a perda de carga por atrito.

A diferença entre os valores de  $k$  obtidos para cada caso é resultante da natureza dos sólidos incorporados, que reagiram com os componentes da emulsão de formas distintas. A maior viscosidade gerada nas emulsões após a adição de argila é atribuída à ação conjunta das barreiras físicas formadas pelas partículas do sólido na interface óleo-água da emulsão, que impedem a coalescência das gotículas dispersas, e das redes tridimensionais formadas pelas lamelas argilominerais, que reduzem a mobilidade das gotas, conforme relatado por Costa (2019). A viscosidade das emulsões foi menor para menores tamanhos de gotas dispersos, comportamento igualmente exposto por Kokal (2005). Dessa forma, com a não-coalescência das gotas, estas permaneceram pequenas o suficiente, gerando uma alta viscosidade. Outro fator que influencia na viscosidade das emulsões é o tamanho das partículas

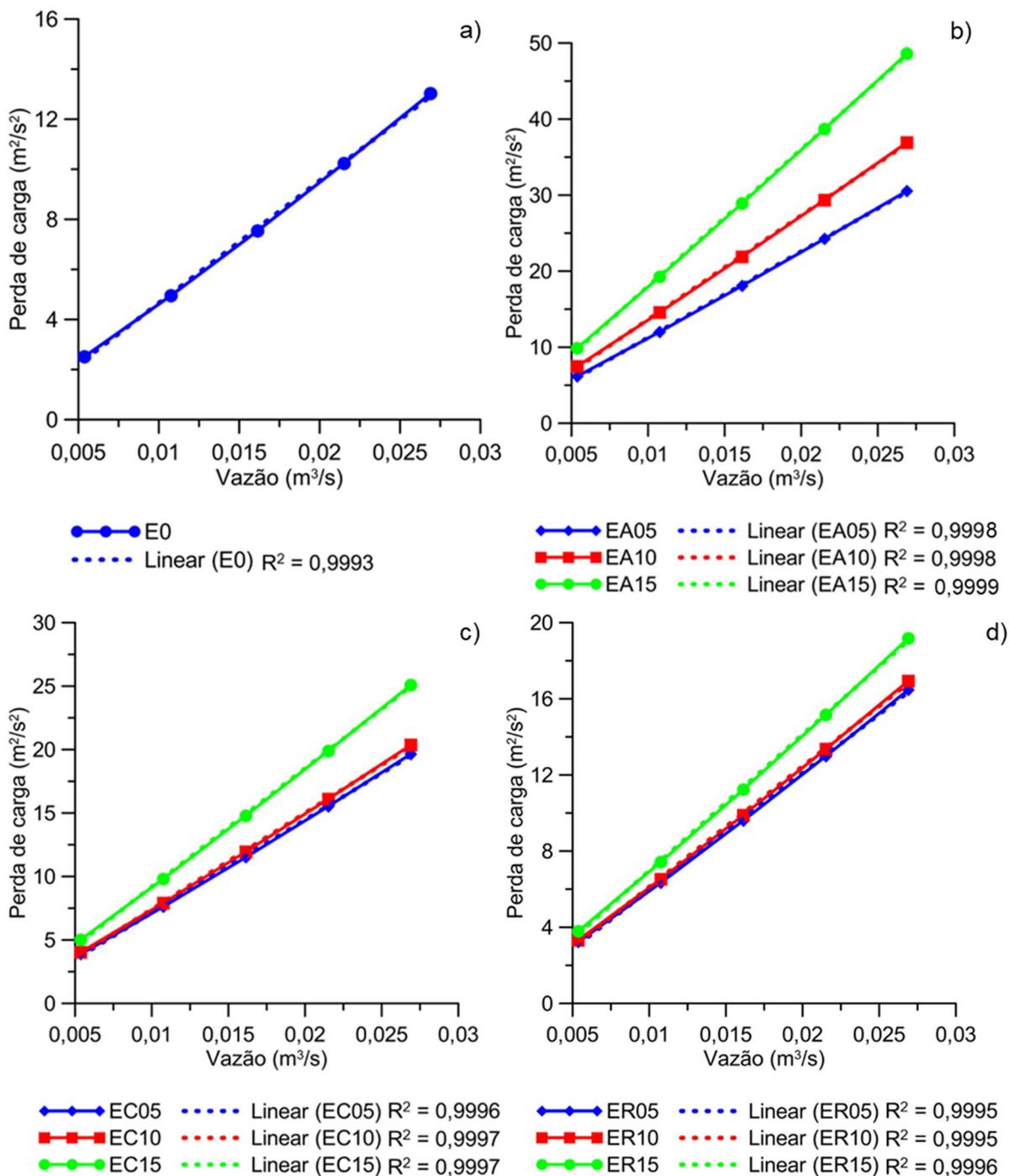
sólidas, pois, menores partículas possuem maior superfície específica, o que resulta em um maior atrito entre elas, causando um aumento na viscosidade da emulsão, resultado semelhante foi observado por Silva (2014). Costa (2019) avaliou que o sólido que apresentou o menor tamanho médio de partícula foi a argila, tendo este sólido contribuído para os maiores valores de viscosidade das emulsões, como pode ser observado na Figura 22 e na Tabela 3.

Além disso, o aumento discreto das viscosidades das emulsões adicionadas de carbonato de cálcio se deu pela presença de íons divalentes de cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), pois estes possuem capacidade de interligar as partículas coloidais de carbonato, aumentando o potencial de formação de estruturas agregadas e floculadas, segundo exposto por Costa (2019). Este fator pode ter influenciado os maiores valores de viscosidade encontrados para as emulsões incorporadas com carbonato de cálcio, em comparação com as adicionadas de areia, já que para estas últimas, o tamanho da partícula sólida era menor.

Em contrapartida, no trabalho de Imam *et al.* (2014), a densidade do fluido, aparentemente, contribuiu de forma mais significativa na perda de carga do que a viscosidade. Os autores avaliaram a perda de carga em um *flow-loop* cuja tubulação possuía 4 polegadas de diâmetro. Para isso circularam água e óleo com valores de densidade de  $795 \text{ kg/m}^3$  e  $998 \text{ kg/m}^3$ , respectivamente, e valores de viscosidade de  $0,798 \text{ Pa.s}$  e  $1,56 \text{ Pa.s}$ , respectivamente. Os autores observaram que o escoamento de água produziu uma perda de carga maior do que o de óleo, mostrando uma tendência diferente à percebida no presente trabalho.

#### 4.4.4. Perda de carga vs. vazão volumétrica

Na Figura 27 estão apresentadas as curvas da perda de carga em função da vazão do escoamento no anular das emulsões estudadas.



**Figura 27.** Perda de carga em função da vazão volumétrica das emulsões a) sem sólidos, b) incorporadas com argila, c) incorporadas com carbonato de cálcio e d) incorporadas com areia.

É nítido que com o aumento da vazão a perda de carga também aumenta, e que essa é uma relação linear. De acordo com Ramsey (2019), a perda de carga cresce linearmente com a vazão, ou seja, se a vazão aumenta em 10%, a perda de carga também aumentará 10%. As equações geradas para cada curva seguem a

equação linear  $y = ax + b$ , com os coeficientes angular (a) e linear (b) apresentados na Tabela 9, bem como os coeficientes de determinação ( $R^2$ ).

**Tabela 9.** Coeficientes das curvas ajustadas da perda de carga vs. vazão volumétrica

| Emulsão | a       | b        | $R^2$  |
|---------|---------|----------|--------|
| E0      | 488,90  | - 0,2345 | 0,9993 |
| EA05    | 1133,70 | - 0,0832 | 0,9998 |
| EA10    | 1368,80 | - 0,0462 | 0,9998 |
| EA15    | 1800,60 | 0,0041   | 0,9999 |
| EC05    | 732,80  | - 0,1848 | 0,9996 |
| EC10    | 758,96  | - 0,1779 | 0,9997 |
| EC15    | 933,15  | - 0,1403 | 0,9997 |
| ER05    | 615,74  | - 0,2097 | 0,9995 |
| ER10    | 632,92  | - 0,2084 | 0,9995 |
| ER15    | 715,38  | - 0,1894 | 0,9996 |

Como pode ser observado, o coeficiente angular (ou inclinação da reta) aumentou com o aumento da concentração de sólidos nas emulsões, apresentando uma relação direta com a perda de carga: quanto maior a perda de carga, maior a inclinação da reta. Já o coeficiente linear foi negativo para todas as curvas, com exceção da curva gerada pela emulsão incorporada com 15% de argila (EA15), que também apresentou o maior valor de perda de carga.

Embora os valores dos coeficientes de determinação para cada emulsão possuam uma diferença insignificante, é possível perceber que quanto maior o valor do índice de consistência, mais o coeficiente de determinação se aproxima de 1, como é o caso da emulsão EA15, com  $R^2 = 0,9999$  e  $k = 3125\text{cP}$ , e da emulsão E0, com  $R^2 = 0,9993$  e  $k = 779\text{cP}$ . Ainda assim, para todos os casos, os valores de  $R^2$  são muito

próximos de 1, e, portanto, é possível afirmar que seguiram a tendência linear entre o aumento da vazão e da perda de carga.

Além disso, ficou ainda mais evidenciado que a perda de carga gerada pelo escoamento das emulsões incorporadas com 5 e 10% de carbonato de cálcio e de areia, apresentou valores muito próximos, como mostrado nas imagens (c) e (d) da Figura 24. Isto já havia sido observado nas Figuras 22 e 23.

#### 4.5. Potência hidráulica da bomba

A partir dos dados obtidos de vazão volumétrica e perda de carga, é possível calcular a potência hidráulica necessária para neutralizar os efeitos de perda de carga durante a circulação do fluido, utilizando a Equação (24). Os resultados podem ser visualizados na Tabela 10.

**Tabela 10.** Potência hidráulica necessária para neutralizar a perda de carga.

| Vazão (m <sup>3</sup> /s) | Potência hidráulica (hp) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                           | E0                       | EA05  | EA10  | EA15  | EC05  | EC10  | EC15  | ER05  | ER10  | ER15  |
| 0,005                     | 0,017                    | 0,046 | 0,060 | 0,085 | 0,030 | 0,033 | 0,045 | 0,023 | 0,025 | 0,031 |
| 0,011                     | 0,069                    | 0,179 | 0,232 | 0,330 | 0,116 | 0,130 | 0,177 | 0,092 | 0,100 | 0,120 |
| 0,016                     | 0,157                    | 0,403 | 0,523 | 0,743 | 0,263 | 0,295 | 0,399 | 0,209 | 0,227 | 0,271 |
| 0,022                     | 0,283                    | 0,722 | 0,934 | 1,325 | 0,473 | 0,529 | 0,716 | 0,377 | 0,409 | 0,488 |
| 0,027                     | 0,451                    | 1,136 | 1,469 | 2,081 | 0,748 | 0,836 | 1,128 | 0,598 | 0,648 | 0,771 |

Os valores de potência apresentados na Tabela 10 podem parecer muito pequenos se comparados com a potência obtida em situações reais, porém é necessário levar em consideração que o poço simulado é muito pequeno, com apenas

5 metros de comprimento, e a perda de carga resultante não foi tão alta quanto seria em um poço de dimensões reais. Ainda assim, é possível observar que a potência necessária para superar os efeitos de perda de energia por atrito varia muito, a depender do tipo de emulsão circulada e da vazão volumétrica, chegando a apresentar uma diferença de 1,63 hp entre as emulsões E0 (menor perda de carga) e EA15 (maior perda de carga) circulando com o maior valor de vazão volumétrica ( $0,027 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

## 5. CONCLUSÕES

Com o objetivo de estudar o escoamento de emulsões inversas de base olefínica incorporadas com diferentes sólidos no anular de um poço vertical, e a perda de carga gerada por esse escoamento, utilizando a fluidodinâmica computacional, concluiu-se que:

- O modelo numérico apresentou uma boa correlação com as equações analíticas referentes a determinação da perda de carga, apresentando um erro de 0,22%;
- Os perfis de taxa de cisalhamento estavam condizentes com a literatura, apresentando valor máximo nas paredes, e zero nas proximidades da região central, para o escoamento completamente desenvolvido;
- As curvas de viscosidade numérica apresentaram um bom ajuste com as curvas experimentais, apenas apresentando menores valores de viscosidade em baixas taxas de cisalhamento ( $< 0,65\text{s}^{-1}$ );
- Para as emulsões incorporadas com areia e carbonato de cálcio, o aumento da perda de carga não foi muito expressivo quando a concentração passou de 5 para 10%;
- O aumento da densidade nas emulsões resultou em aumento na perda de carga, porém a emulsão com maior densidade não apresentou a maior perda de carga;
- Apenas para as emulsões incorporadas com argila, o índice de comportamento,  $n$ , apresentou uma correlação direta com a perda de carga;

- O índice de consistência,  $k$ , foi o parâmetro que exerceu maior influência na perda de carga, tendo a emulsão com maior valor de  $k$  apresentado a maior perda de carga; e
- A perda de carga aumentou com o aumento da vazão do escoamento, e a relação entre as duas variáveis foi linear.
- A potência hidráulica da bomba apresentou variações dependentes da emulsão circulada e da vazão volumétrica, tendo uma diferença máxima de 1,63 hp para as emulsões E0 e EA15 circulando com a maior vazão.

De forma geral, o modelo numérico desenvolvido foi capaz de produzir resultados adequados com a literatura, e o escoamento e a perda de carga puderam ser avaliados na circulação das emulsões no anular do poço. A perda de carga tendeu a aumentar com o aumento da concentração de sólidos, apresentando diferenças na intensidade de acordo com a natureza de cada um. Constatou-se que o sólido que promoveu as mudanças mais significativas nos parâmetros reológicos das emulsões foi a argila, tendo o escoamento destas, conseqüentemente, gerado as maiores perdas de cargas, em comparação com o carbonato de cálcio e a areia, e sendo necessário uma maior potência hidráulica aplicada no bombeio das mesmas.

## **6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Estudar a perda de carga no escoamento dos fluidos de perfuração olefnicos, com incorporação de argila bentonítica, carbonato de cálcio e areia;
- Avaliar a perda de carga em um modelo numérico multifásico, com uma fase líquida (fluido de perfuração) e uma fase sólida (sólidos incorporados);
- Avaliar o efeito de rotação da coluna;

## REFERÊNCIAS

BICALHO, I. C. **Estudo experimental e de simulação por CFD de escoamentos em seções anulares com excentricidade variável e obstrução parcial da coluna**. 2015. 213 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, 2015.

BOURGOYNE JÚNIOR, A. T., MILLHEIM, K. K., CHENEVERT, M. E., YOUNG JÚNIOR, F. S. **Applied drilling engineering**. vol. 2. Texas: SPE Textbook Series, 1986.

ÇENGEL, Y. A., CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos: fundamentos e aplicações**. Porto Alegre: AMGH, 2012.

COSTA, W. R. P. da. **Análise do impacto da adição de sólidos às propriedades de emulsões olefinicas usadas em fluidos de perfuração**. 2019. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Exploração Petrolífera e Mineral, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

DARLEY, H. C. H., GRAY, G. R. **Composition and properties of drilling and completion fluids**. 5. ed. Houston: Gulf Publishing Company, 1988.

DEHKORDI, P. B., AZDARPOUR, A., MOHAMMADIAN, E. The hydrodynamic behavior of high viscous oil-water flow through horizontal pipe undergoing sudden expansion—CFD study and experimental validation. **Chemical Engineering Research and Design**, [s.l.], v. 139, p. 144-161, nov. 2018.

DEHKORDI, P. B., COLOMBO, L. P. M., GUILIZZONI, M., SOTGIA, G. CFD simulation with experimental validation of oil-water core-annular flows through Venturi and Nozzle flow meters. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, [s.l.], v. 149, p. 540-552, jan. 2017.

ELGER, D. F., WILLIAMS, B. C., CROWE, C. T., ROBERSON, J. A. **Engineering Fluid Mechanics**. 10. Ed. Hoboken: Wiley, 2013.

EPELLE, E. I., GEROGIORGIS, D. I. A multiparametric CFD analysis of multiphase annular flows for oil and gas drilling applications. **Computers & Chemical Engineering**, [s.l.], v. 106, p. 645-661, 2017.

ERGE, O., OZBAYOGLU, E. M., MISKA, S. Z., YU, M., TAKACH, N., SAASEN, A., MAY, R. CFD analysis and model comparison of annular frictional pressure losses while circulating yield power law fluids. In: SPE Bergen One Day Seminar, 2015, Bergen. **Proceedings** [...]. Bergen: SPE, 2015. p. 1-22.

ERSHADNIA, R., AMOOIE, M. A., SHAMS, R., HAJIREZAIE, S., LIU, Y., JAMSHIDI, S., SOLTANIAN, M. R. Non-Newtonian fluid flow dynamics in rotating annular media: Physics-based and data-driven modeling. **Journal of Petroleum science and Engineering**, [s.l.], v. 185, p. 1-18, 2020.

FERROUDJI, H., HADJADJ, A., HADDAD, A., OFEI, T. N. Numerical study of parameters affecting pressure drop of power-law fluid in horizontal annulus for laminar and turbulent flows. **Journal of Petroleum Exploration and Production Technology**, [s.l.], p.1-11, 1 jun. 2019.

FERZIGER, J. H., PERIĆ, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. 3. ed. Berlin etc., Springer-Verlag, 2002.

FORTUNA, A. O. **Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos: Conceitos Básicos e Aplicações**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2000.

FOX, R. W., MCDONALD, A. T., PRITCHARD, P. J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 8. ed. LTC, 2014.

GHOSH, S., DAS, G., DAS, P. K. Simulation of core annular downflow through CFD— A comprehensive study. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, [s.l.], v. 49, n. 11, p. 1222-1228, nov. 2010.

GULRAIZ, S., GRAY, K. E. Investigating the effects of plug viscosity on annular pressure drop and cuttings transport in a concentric annulus. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**. [s.l.], p. 1-13, abril 2020.

GUO, B., LIU, G. **Applied Drilling Circulation Systems: Hydraulics, Calculations and Models**. 1. ed. Burlington: Elsevier, 2011.

HAGHSHENAS, A. Rheology of Single-Phase Fluids. In: REHM, B., HAGHSHENAS, A., PAKNEJAD, A., AL-YAMI, A., HUGHES, J., SCHUBERT, J. **Underbalanced**

**Drilling: Limits and Extremes.** 1. ed. Houston: Gulf Publishing Company, 2012. cap. 2, p. 79-102.

HERIOT WATT UNIVERSITY. **Drilling Engineering.** 1. ed. Edimburgo: Heriot Watt University, 2005.

IADC (ed.). **IADC Drilling Manual.** 12. ed. [s.l.]: IADC, 2014.

IMAN, M. M., BASHA, M., SHAAHID, S. M., AHMAD, A., AL-HADHRAMI, L. M. Effect of viscosity on the pressure gradient in a 4-inch pipe. In: ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2014, Montreal. **Proceedings [...]** . Montreal: IMECE, 2014. p. 1-5.

JOTHI, M., HAIMANOT, R., KUMAR, U. Investigation on pressure drop of fluid-solid mixture flow through pipes using CFD and SK model. **Journal of Applied Mathematics and Physics.** [s.l.], v. 7, p. 218-232, 2019.

KIRAN, R., AHMED, R., SALEHI, S. Experiments and CFD modelling for two phase flow in a vertical annulus. **Chemical Engineering Research and Design,** [s.l.], v. 153, p. 201-211, jan. 2020.

KOKAL, S. L. Crude Oil Emulsions: a state-of-the-art review. **SPE Production & Facilities,** [S.L.], v. 20, n. 01, p. 5-13, 1 fev. 2005.

KRISHNA, K. V., SWATHI, K., HEMALATHA, M., MOHAN, S. V. Bioelectrocatalyst in Microbial Electrochemical Systems and Extracellular Electron Transport. **Microbial Electrochemical Technology,** [S.L.], p. 117-141, 2019.

KUNDU, P. K., COHEN, I. M., DOWLING, D. R. (ed.). **Fluid Mechanics.** 5. ed. Waltham, Ma: Elsevier, 2012.

MACHADO, J. C. V. **Reologia e Escoamento de Fluidos: Ênfase na Indústria do Petróleo.** 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2002.

MAITELLI, C. W. S. P. **Simulação do escoamento monofásico em um estágio de uma bomba centrífuga utilizando técnicas de fluidodinâmica computacional.** 2010. 182 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Petróleo) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2010.

MALISKA, C.R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**, LTC, Rio de Janeiro, 1995.

MARTINS, V. A. M. **Fluidodinâmica computacional aplicada à geração e propagação de ondas em um reservatório**. 2016. 64 p. TCC (Graduação em Engenharia de Petróleo) – Departamento de Engenharia Química e de Petróleo, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2016.

MATOUSEK, V. Pressure Drops and Flow Patterns in Sand-Mixture Pipes. **Experimental Thermal and Fluid Science**. [s.l.], v. 26, p. 693-702, nov. 2002.

MAZUMDER, Sandip. **Numerical Methods for Partial Differential Equations: finite difference and finite volume methods**. San Diego: Academic Press, 2016.

NEVES, E. E.; BEZERRA, Y. S. de F. Método dos volumes finitos: uma abordagem prática e aplicação em problemas de difusão térmica com MATLAB®. **Carpe Diem: Revista Cultura e Científica do UNIFACEX**, v. 11, n. 11, p. 1-18, 2013.

PETROBRAS. **Plano de Negócio e Gestão 2020-2024**. 2019. Acesso em: 16/11/2020. Disponível em: < <http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/plano-de-negocios-e-gestao/>>

PINTO, J. C., LAGE, P. L. C. **Métodos Numéricos em Problemas de Engenharia Química**. Rio de Janeiro: Editora E-Papers, 1997.

RAMSEY, M. S. Rheology, Viscosity, and Fluid Types. **Practical Wellbore Hydraulics and Hole Cleaning**, [S.L.], p. 217-237, 2019.

RUSHD, S., SHAZED, A. R., FAIZ, T., KELESSIDIS, V., HASSAN, I. G., RAHMAN, A. CFD simulation of pressure losses in eccentric horizontal wells. In: SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference, 2017, Manama. **Proceedings** [...]. Manama: SPE, 2017. p. 1-9.

SAEID, N. H., BUSAHMIN, B. S. Numerical investigations of drilling mud flow characteristics in vertical well. **Engineering Science and Technology: An International Journal**, [s.l.], p. 16-22, jul.-ago. 2016.

SANSONI JR., U. **Avaliação por simulação computacional da circulação reversa na perfuração de poços de petróleo**. 2005. 159 f. Dissertação (Mestrado) - Curso

de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

SANTOS, N. B. C. **Estabilidade de suspensões pseudoplásticas utilizadas na perfuração de poços de petróleo.** 2017. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

SAYINDLA, S., LUND, B., YTREHUS, J. D., SAASEN, A. CFD Modeling of Hydraulic Behavior of Oil- and Water-Based Drilling Fluids in Laminar Flow. **Spe Drilling & Completion**, [s.l.], v. 34, n. 03, p.207-215, 1 set. 2019.

SILVA, C. H. **Influência da incorporação de sólidos nas propriedades de fluidos de perfuração sintéticos.** 2014. 82 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

SORGUN, M., OZBAYOGLU, M. E. Predicting frictional pressure loss during horizontal drilling for non-Newtonian fluids. **Energy Sources, Part A.** [s.l.], v. 33, p. 631-640, 2011.

SOUZA, J. A. **Implementação de um método de volumes finitos com sistema de coordenadas locais para a solução acoplada das equações de Navier-Stokes.** 2000. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

STOUT, S. A., PAYNE, J. R. Footprint, weathering, and persistence of synthetic-base drilling mud olefins in deep-sea sediments following the Deepwater Horizon disaster. **Marine Pollution Bulletin**, [s.l.], vol. 118, n. 1-2, p.328-340, 2017.

SULTAN, R. A., RAHMAN, M. A., RUSHD, S., ZENDEHBOUDI, S., KALESSIDIS, V. C. CFD Analysis of Pressure Losses and Deposition Velocities in Horizontal Annuli. **International Journal of Chemical Engineering**, [s.l.], v. 2019, p.1-17, 3 fev. 2019.

TRIPATHI, S., BHATTACHARYA, A., SINGH, R., TABOR, R. F. Lubricated Transport of Highly Viscous Non-newtonian Fluid as Core-annular Flow: A CFD Study. **Procedia IUTAM**, [s.l.], v. 15, p. 278-285, 2015.

TU, J., YEOH, G. H., LIU, C. **Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach**. 3. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2018.

VERMA, A. K., SINGH, S. N., SESHADRI, V. Pressure drop for the flow of high concentration solid-liquid mixture across 90° horizontal conventional circular pipe bend. **Indian Journal of Engineering and Materials Sciences**, [s.l.], v. 6, n. 13, p. 477-483, dez. 2006.

WAMSLEY JR., W. H., FORD, R. Introduction to Roller-Cone and Polycrystalline Diamond Drill Bits. In: MITCHELL, R. F. (Ed.). **Drilling Engineering**. 1. ed. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2006.

WEST, G., HALL, J., SEATON, S. Drilling Fluids. In: MITCHELL, R. F. (Ed.). **Drilling Engineering**. 1. ed. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2006.

WHITE, F. M. **Mecânica dos fluidos**. 6. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

WHITE, F. M. **Viscous fluid flow**. 3. ed. Nova York: McGraw-Hill, 2006.