



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA

PPGEQ UFAL
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Química

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

BIANCA FERREIRA CONDE

VALIDAÇÃO NUMÉRICA DA PERCOLAÇÃO DE DERIVADOS DE PETRÓLEO EM
MEIOS POROSOS UTILIZANDO O OPENFOAM

Maceió/AL

2023

BIANCA FERREIRA CONDE

**VALIDAÇÃO NUMÉRICA DA PERCOLAÇÃO DE DERIVADOS DE PETRÓLEO
EM MEIOS POROSOS UTILIZANDO O OPENFOAM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Alagoas, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Rodolfo Junqueira Brandão

Coorientador: Prof. Dr. João Inácio Soletti

Maceió/AL

2023

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos – CRB-4 – 2062

C745v Conde, Bianca Ferreira.
Validação numérica da percolação de derivados de petróleo em meios porosos utilizando o OpenFOAM / Bianca Ferreira Conde. – 2023.
78 f. : il. color.

Orientador: Rodolfo Junqueira Brandão.

Coorientador: João Inácio Soletti.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Maceió, 2023.

Bibliografia: f. 75-78.

1. Derramamento de óleo. 2. Percolação – Derivados de petróleo. 3. Fluidos. 4. Fluidodinâmica computacional. I. Título.

CDU: 66.0

Bianca Ferreira Conde

VALIDAÇÃO NUMÉRICA DA PERCOLAÇÃO DE DERIVADOS DE PETRÓLEO EM MEIOS POROSOS UTILIZANDO O OPENFOAM

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Alagoas,
como requisito para a obtenção do
Título de Mestre em Engenharia
Química.

Aprovada em: Maceió, 27 de julho de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente

gov.br

RODOLFO JUNQUEIRA BRANDAO

Data: 02/08/2023 21:12:19-0300

Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Rodolfo Junqueira Brandao (Orientador - PPGEQ/UFAL)

Documento assinado digitalmente

gov.br

JOAO INACIO SOLETTI

Data: 03/08/2023 09:55:00-0300

Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. João Inácio Soletti (Coorientador - PPGEQ/UFAL)

Documento assinado digitalmente

gov.br

EDUARDO LUCENA CAVALCANTE DE AMOR

Data: 02/08/2023 18:56:32-0300

Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Eduardo Lucena Cavalcante de Amorim (PPGEQ/UFAL)

Documento assinado digitalmente

gov.br

Leonardo Mendonca Tenorio de Magalha

Data: 02/08/2023 13:01:06-0300

Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Leonardo Mendonça Tenório de Magalhães Oliveira (PPGEQ/UFAL)

Documento assinado digitalmente

gov.br

LIVIA MARIA DE OLIVEIRA RIBEIRO

Data: 01/08/2023 18:17:33-0300

Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profª. Drª. Livia Maria de Oliveira Ribeiro (PPGEQ/UFAL)

Documento assinado digitalmente

gov.br

THAIS LOGETTO CAETITE GOMES

Data: 02/08/2023 20:52:31-0300

Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profª. Drª. Thais Logetto Caetite Gomes (UFU)

AGRADECIMENTOS

Primordialmente, quero agradecer a Deus por ter me dado força, coragem e saúde e ter mostrado a melhor maneira para superar as dificuldades, e mesmo nos momentos em que me senti fraca, Ele me mostrou que eu poderia ser mais forte e que os seus planos são maiores que os meus.

Agradeço aos meus avós Lourdes e Ricardo por sempre confiarem em mim e me ajudarem em todos os momentos. A minha mãe por me manter forte e mostrar que sou capaz de coisas inimagináveis. Aos meus tios Fábio e Flávia por serem exemplos para mim, e estarem comigo sempre que preciso. Ao meu primo Marcos Ricardo e meu irmão João Miguel que mesmo sem saber ou entender me dão forças e me fazem querer ser um ser humano melhor. Ao meu namorado Wesley por todo apoio, compreensão e lanchinhos, principalmente nessa reta final. Esse mérito também é de todos vocês.

Exprimo eterna gratidão ao meu orientador Prof. Dr. Rodolfo Junqueira Brandão por todos os puxões de orelha, apoio, e por acreditar e não desistir de mim, e sempre mostrar que eu consigo chegar aonde quero, só basta eu querer. Por toda paciência, dedicação, comprometimento e por sempre buscar o melhor para todos os seus alunos.

Aos meus companheiros do Lassop e FlowLab o meu muito obrigada por sempre depositarem confiança em mim, até quando me faltava. Todos vocês fizeram essa caminhada ser mais leve. Em especial agradeço a Felipe, Ícaro, Ivis, Cleyla e Kleber por tirarem todas as minhas dúvidas com o maior carinho possível, sejam elas das mais bestas até as mais complexas, além de me ajudarem em tudo que estavam ao alcance deles (e até o que não estava). Espero levar todos vocês para vida. Agradeço demais a Livia por todas as caronas, por sempre me ouvir com calma e paciência e sempre tentar me mostrar o melhor caminho e seguir meu coração, sua amizade foi essencial para que eu continuasse firme e seguisse a diante. Agradeço em geral, a todos os meus amigos, que sempre me apoiaram, ajudaram e confiaram em meu potencial.

A minha avó Gleides, que em vida fez de tudo pra me ver bem e feliz, sei que a senhora sempre olhará por mim, assim como estará eternamente em minhas orações.

E por fim, agradeço a Universidade Federal de Alagoas e aos órgãos de fomento CNPq, Capes e FAPEAL.

Cuide das coisas de Deus e ele cuidará das suas!

RESUMO

Derramamentos de petróleo podem ter diversas consequências tanto ao meio aquático, quanto ao terrestre. Além da toxicidade pelo contato com os seres vivos, o ambiente torna-se inóspito para o desenvolvimento de diversas espécies. Uma das consequências, é a percolação de petróleo em areias da praia, dificultando assim a sua remoção e tratamento. Diante disso, a modelagem computacional pode ser utilizada para investigar os efeitos da percolação de petróleo em leitos arenosos. Diante disso este trabalho tem como intuito a avaliação e validação numérica da percolação de derivados de petróleo em meios porosos, através de uma avaliação sistemática da equação de Darcy-Forchheimer com o auxílio do *software* OpenFOAM v. 10. Os estudos foram realizados através de avaliações exploratórias, análise de sensibilidade e planejamento composto central, sendo possível avaliar diferentes comportamentos nas coordenadas (x, y, z), nos quais os parâmetros assumiram valores D_{xz} , D_y , F_{xz} e F_y . O estudo numérico foi realizado com base em dados medidos experimentalmente, onde foram utilizadas amostras de óleo lubrificantes automotivos com diferentes viscosidades ($5,73e-5 \text{ m}^2/\text{s}^2$, $7,72e-5 \text{ m}^2/\text{s}^2$ e $1,64e-4 \text{ m}^2/\text{s}^2$). Assim, foi possível avaliar que os parâmetros D e F da equação de Darcy-Forchheimer estão relacionados diretamente com a intensidade da percolação do óleo no meio poroso, entretanto, individualmente possuem baixo nível de significância. De acordo com a ANOVA, os parâmetros D_y e F_{xz} das simulações apresentaram erro médio quadrático $\leq 0,93\%$ em relação aos dados experimentais. Diante disso, os resultados encontrados se mostraram satisfatórios, demonstrando a eficácia da metodologia abordada utilizando a técnica do CFD, permitindo a obtenção de equações para predição da profundidade de percolação e diâmetro da molhabilidade, podendo o estudo ser aplicado em futuros casos de derramamento.

Palavras-Chave: Percolação em meios porosos; Fluidos; Fluidodinâmica Computacional; Darcy- Forchheimer; Derramamento de óleo.

ABSTRACT

Oil spills can have several consequences for both the aquatic and terrestrial environment. In addition to the toxicity caused by contact with living beings, the environment becomes inhospitable for the development of several species. One of the consequences is the percolation of oil in beach sand, thus making its removal and treatment difficult. Therefore, computational modeling can be used to investigate the effects of oil percolation in sandy beds. Therefore, this work aims to evaluate and numerically validate the percolation of petroleum derivatives in porous media, through a systematic evaluation of the Darcy-Forchheimer equation with the aid of the software OpenFOAM v. 10. The studies were carried out through exploratory evaluations, sensitivity analysis and central composite planning, making it possible to evaluate different behaviors in the coordinates (x, y, z), in which the parameters assumed D_{xz} , D_y , F_{xz} and F_y values. The numerical study was carried out based on experimentally measured data, where automotive lubricating oil samples with different viscosities were used ($5.73e-5 \text{ m}^2/\text{s}^2$, $7.72e-5 \text{ m}^2/\text{s}^2$ and $1.64e-4 \text{ m}^2/\text{s}^2$). Thus, it was possible to assess that the parameters D and F of the Darcy-Forchheimer equation are directly related to the intensity of oil percolation in the porous medium, however, individually they have a low level of significance. According to ANOVA, the D_y and F_{xz} parameters of the simulations presented mean squared error $\leq 0.93\%$ in relation to the experimental data. In view of this, the results found were satisfactory, demonstrating the effectiveness of the methodology addressed using the CFD technique, allowing the obtaining of equations for predicting the percolation depth and wettability diameter, allowing the study to be applied in future cases of spillage.

Key-words: Percolation in porous media; Fluids; Computational Fluid Dynamics; Darcy-Forchheimer; Oil spill.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1- Balanço de massa para um elemento de volume. | 18 |
| Figura 2- Ilustração de Darcy da coluna vertical (Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon)..... | 21 |
| Figura 3- Gráfico comparativo entre as Leis de Darcy e Forchheimer. | 23 |
| Figura 4- Equação de Navier-Stokes resolvidas via CFD. | 25 |
| Figura 5- Etapas utilizadas durante a simulação CFD..... | 27 |
| Figura 6- Modelo de uma malha estruturada em 2D. | 30 |
| Figura 7- Modelo de uma malha triangular desestruturada em 2D. | 30 |
| Figura 8- Tubulação em PVC totalmente preenchido com areia sem umidade. | 34 |
| Figura 9- Escoamento do óleo na tubulação com utilização da pipeta..... | 35 |
| Figura 10- (a) Tubulação usada experimentalmente. (b) Tubulação simulada | 36 |
| Figura 11- (a) Representação da superfície inlet e (b) outlet | 37 |
| Figura 12- (a) Vista superior da geometria com sua malha computacional. (b) Geometria computacional com sua determinada malha. | 37 |
| Figura 13- Representação das coordenadas de acordo com a geometria. | 39 |
| Figura 14- (a) Visão de onde corte será realizado. (b) Corte realizado na geometria. | 46 |
| Figura 15- (a) Comportamento da simulação 21 do óleo de viscosidade $7,72E-05 \mu\text{m}$ no tempo de 300 segundos utilizando D_{xz} e D_y . (b) Comportamento da simulação 22 (c) Comportamento da simulação 23. (d) Comportamento da simulação 24 (e) Comportamento da simulação 25. | 47 |
| Figura 16- (a) Comportamento da simulação 17 do óleo de viscosidade $7,72E-05 \mu\text{m}$ no tempo de 300 segundos utilizando D_{xz} , D_y , F_{xz} e F_y . (b) Comportamento da simulação 18. (c) Comportamento da simulação 19. (d) Comportamento da simulação 20..... | 49 |
| Figura 17- (a) Gráfico D_{xz} (-) x Diâmetro (cm). (b) Gráfico D_y (-) x Diâmetro (cm)..... | 50 |
| Figura 18- (a) Gráfico D_{xz} (-) x Profundidade (cm). (b) Gráfico D_y (-) x Profundidade (cm). | 51 |
| Figura 19- (a) Gráfico D_{xz} (-) x Diâmetro (cm). (b) Gráfico D_y (-) x Diâmetro (cm). (c) Gráfico F_{xz} (-) x Diâmetro (cm). (d) Gráfico F_y (-) x Diâmetro (cm)..... | 52 |

| | |
|---|----|
| Figura 20- (a) Gráfico D_{xz} (-) x Profundidade (cm). (b) Gráfico D_y (-) x Profundidade (cm). (c) Gráfico F_{xz} (-) x Profundidade (cm). (d) Gráfico F_y (-) x Profundidade (cm). | 53 |
| Figura 21- Vista frontal e superior da percolação do óleo de viscosidade $5,73E-05 \text{ m}^2/\text{s}^2$ no tempo de 300 segundos a partir dos valores de D_{xz} e D_y | 57 |
| Figura 22- Vista frontal e superior da percolação do óleo de viscosidade $5,73E-05 \text{ m}^2/\text{s}^2$ no tempo de 300 segundos a partir dos valores de D_{xz} , D_y , F_{xz} e F_y | 62 |
| Figura 23- (a) Gráfico com exponencial do D_y em função do diâmetro (cm). (b) Gráfico com exponencial do D_y em função da profundidade (cm). | 64 |
| Figura 24- (a) Gráfico com exponencial do F_{xz} em função do diâmetro (cm). (b) Gráfico com exponencial do F_{xz} em função da profundidade (cm). | 66 |
| Figura 25- Percolação do óleo de viscosidade $7,72E-05 \text{ m}^2/\text{s}^2$ na granulometria de $5,468 \mu\text{m}$ (a) e (c) e $3,063 \mu\text{m}$ (b) e (d). | 68 |
| Figura 26- Percolação do óleo de viscosidade $7,72E-05 \text{ m}^2/\text{s}^2$ na granulometria de $5,0644 \mu\text{m}$ (a) e (c) e $3,063 \mu\text{m}$ de granulometria e viscosidade de óleo $5,73E-05 \text{ m}^2/\text{s}^2$ (b) e (d). | 69 |
| Figura 27- Percolação do óleo de viscosidade $1,64E-04 \text{ m}^2/\text{s}^2$ na granulometria de $5,468 \mu\text{m}$ (a) e (c) e $5,0644 \mu\text{m}$ (b) e (d). | 70 |
| Figura 28- Superfície de resposta do D_{sim} avaliando $\text{Log}_{10} D_y$ e $\text{Log}_{10} F_{xz}$ | 71 |
| Figura 29- Superfície de resposta da P_{sim} avaliando $\text{Log}_{10} D_y$ e $\text{Log}_{10} F_{xz}$ | 72 |
| Figura 30- (a) Superfície de resposta de D_{sim} avaliando $\text{Log}_{10} D_{xz}$ e $\text{Log}_{10} F_y$. (b) Superfície de resposta de P_{sim} avaliando $\text{Log}_{10} D_{xz}$ e $\text{Log}_{10} F_y$ | 72 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1- Características físico-químicas dos óleos lubrificantes..... | 34 |
| Tabela 2- Dados da percolação dos óleos obtidos experimentalmente. | 35 |
| Tabela 3- Especificação dos óleos utilizados para simulação computacional..... | 38 |
| Tabela 4- Informações para os valores de "D". | 39 |
| Tabela 5- Valores mínimos e máximos (log 10) para D_{xz} e D_y | 40 |
| Tabela 6- Planejamento composto central gerado com o software Statistica variando (D_{xz} e D_y), | 40 |
| Tabela 7- Valores mínimos e máximos (log 10) para (D_{xz} , D_y , F_{xz} e F_y)..... | 41 |
| Tabela 8- Planejamento composto central gerado com o software Statistica variando (D_{xz} , D_y , F_{xz} e F_y)..... | 41 |
| Tabela 9- Pontos mínimos, máximos e médio de cada parâmetro a partir do PCC. | 42 |
| Tabela 10- Valores dos Log_{10} para as análises de sensibilidades..... | 43 |
| Tabela 11- Planejamento com dados das respostas de D_{sim} (cm) e P_{sim} (cm) de acordo com cada simulação gerada para os valores de D_{xz} e D_y | 45 |
| Tabela 12- Planejamento com dados das respostas em diâmetro (cm) e profundidade (cm) de cada simulação gerada para os valores de D_{xz} , D_y , F_{xz} e D_y | 48 |
| Tabela 13- Efeito do planejamento dos parâmetros D_{xz} e D_y de acordo com valores de diâmetro(cm) simulado..... | 54 |
| Tabela 14- Valores significativos do efeito do planejamento dos parâmetros D_{xz} e D_y de acordo com diâmetro (cm)..... | 54 |
| Tabela 15- Efeito do planejamento dos parâmetros D_{xz} e D_y de acordo com valores da profundidade(cm) simulada..... | 55 |
| Tabela 16- Valores significativos do efeito do planejamento dos parâmetros D_{xz} e D_y de acordo com a profundidade (cm)..... | 55 |
| Tabela 17- Otimização dos valores a partir das Equações da ANOVA utilizando D_{xz} e D_y ... | 56 |
| Tabela 18- Valores encontrados para D_{xz} e D_y a partir dos dados obtidos na otimização. | 56 |
| Tabela 19- Valores para D_{sim} e P_{sim} a partir dos valores de D_{xz} e D_y | 57 |

| | |
|---|----|
| Tabela 20- Efeito do planejamento dos parâmetros D_{xz} , D_y , F_{xz} e F_y de acordo com valores de diâmetro(cm) simulado..... | 58 |
| Tabela 21- Valores significativos do efeito do planejamento dos parâmetros D_{xz} , D_y , F_{xz} e F_y de acordo com diâmetro (cm)..... | 58 |
| Tabela 22- Efeito do planejamento dos parâmetros D_{xz} , D_y , F_{xz} e F_y de acordo com valores da profundidade(cm) simulada..... | 59 |
| Tabela 23- Valores significativos do efeito do planejamento dos parâmetros D_{xz} , D_y , F_{xz} e F_y de acordo com a profundidade (cm)..... | 60 |
| Tabela 24- Otimização dos valores a partir das Equações da ANOVA utilizando D_{xz} , D_y , F_{xz} e F_y | 60 |
| Tabela 25- Valores encontrados para D_{xz} , D_y , F_{xz} e F_y a partir dos dados obtidos na otimização. | 61 |
| Tabela 26- Valores para D_{sim} e P_{sim} a partir dos valores de D_{xz} , D_y , F_{xz} e F_y | 61 |
| Tabela 27- Valores para D_{exp} e P_{exp} de acordo com as análises de sensibilidades. | 62 |
| Tabela 28- Resultados do Log_{10} de D_y para alcance do D_{exp} e P_{exp} e suas respectivas médias aritméticas..... | 64 |
| Tabela 29- Valores de D_{sim} e P_{sim} a partir das resoluções de equações de regressão em função de D_y e seus respectivos erros médios quadráticos..... | 65 |
| Tabela 30- Resultados do Log_{10} de D_y para alcance do D_{exp} e P_{exp} e suas respectivas médias aritméticas..... | 66 |
| Tabela 31- Valores de D_{sim} e P_{sim} a partir das resoluções de equações de regressão em função de F_{xz} e seus respectivos erros médios quadráticos..... | 67 |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 12 |
| 2 OBJETIVOS | 14 |
| 2.1 Objetivo Geral | 14 |
| 2.2 Objetivos Específicos | 14 |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 15 |
| 3.1 Meios Porosos | 15 |
| 3.2 Percolação de fluidos em meios porosos..... | 16 |
| 3.3 Percolação de contaminantes no solo..... | 16 |
| 3.4 Mecânica do fluido..... | 17 |
| 3.4.1 Equação da Continuidade | 17 |
| 3.4.2 Equações de Navier-Stokes | 18 |
| 3.4.3 Equação da difusividade | 19 |
| 3.4.4 Abordagem Euleriana | 20 |
| 3.5 Escoamento Darcyano | 20 |
| 3.5.1 Lei de Darcy..... | 20 |
| 3.6 Escoamento Não Darcyano | 22 |
| 3.6.1 Lei de Forchheimer..... | 22 |
| 3.6.2 Fator Beta ou Coeficiente de Forchheimer | 24 |
| 3.7 Fluidodinâmica computacional | 24 |
| 3.7.1 Pré-processamento..... | 27 |
| 3.7.2 Solver..... | 27 |
| 3.7.3 Pós-processamento..... | 28 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.7.4 | Malha Computacional..... | 28 |
| 3.7.5 | Métodos Numéricos..... | 30 |
| 3.8 | Utilização da simulação numérica nas técnicas de remediação em áreas atingidas por derramamento de óleo | 32 |
| 3.9 | Modelo Darcy-Forchheimer | 32 |
| 4 | MATERIAIS E MÉTODOS | 33 |
| 4.1 | Aparato Experimental para análise da simulação | 33 |
| 4.2 | Simulação Computacional | 35 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 45 |
| 5.1 | Análise das simulações utilizando os parâmetros <i>Dxz</i> e <i>Dy</i> | 45 |
| 5.2 | Análise das simulações utilizando os parâmetros <i>Dxz</i> , <i>Dy</i> , <i>Fxz</i> e <i>Fy</i> | 47 |
| 5.3 | Análise gráfica de sensibilidade utilizando os parâmetros <i>Dxz</i> e <i>Dy</i> | 50 |
| 5.4 | Análise gráfica de sensibilidade utilizando os parâmetros <i>Dxz</i> , <i>Dy</i> , <i>Fxz</i> e | 51 |
| 5.5 | ANOVA, modelos e gráficos de superfície..... | 54 |
| 5.6 | Equações e Gráficos de regressão | 62 |
| 6 | CONCLUSÕES..... | 74 |
| 7 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 75 |

1 INTRODUÇÃO

O petróleo contém em sua composição uma variedade de substâncias que incluem compostos orgânicos voláteis, hidrocarbonetos, sulfetos e metais pesados, sendo seus derivados aplicados de diversas formas na sociedade as quais podem ser citados: tintas, solventes, borrachas sintéticas, cosméticos, entre outros. Dessa forma, o manuseio e descarte inapropriados acarretam preocupações referentes ao potencial de contaminação em solos e em águas subterrâneas em casos de derramamento, além de ser tóxicos para seres vivos em geral. A exposição nos seres humanos pode ocorrer por meio da absorção na pele, inalação e ingestão, causando riscos toxicológicos graves, agudos e crônicos (PENA et al, 2020).

Em solo o efeito do derramamento vem prejudicando a cadeia alimentar em áreas atingidas há mais de 50 anos, tornando uma área que recebe grande destaque devido aos problemas de contaminação do solo. Desta forma torna-se essencial o estudo desses casos, principalmente em meios porosos, uma vez que derramamentos de petróleo cru em cidades litorâneas apresenta-se de forma recorrente, como por exemplo estão os ocorridos: Bacia de Campos - RJ nos anos de 2001 e 2011, Praia de Tramandaí- RS em 2012 e em 2016 ocorreram vários vazamentos no Peru, que apesar de ter ocorrido em terras internacionais, o problema afetou todo o bioma da Amazônia, incluindo sua extensão em território brasileiro.

A modelagem computacional é uma ferramenta crítica para ajudar nos problemas relacionados ao derramamento de óleo, a partir do conhecimento do caso e das características do óleo e da areia é possível prever o caminho que o óleo poderá seguir, a fim de orientar uma resposta. Essa orientação é de extrema importância para conhecer o problema e a modelagem do destino do óleo pode ser fundamental para entender o dano que o óleo pode causar e, finalmente, ajudar com na eficácia e os efeitos de potenciais ações de resposta. (BARKER et al., 2020).

Para uma modelagem bem-sucedida é necessário ter conhecimento dos direcionadores ambientais, como local em que ocorreu o derramamento, tipo do óleo e suas características físico-químicas. Destarte, é essencial que esses dados sejam os mais claros possíveis para que os usuários interpretem devidamente os resultados e consigam utilizá-los no combate aos danos ambientais que podem ser ocasionados. Além das principais previsões do destino e transporte do derramamento, a modelagem computacional também pode ser usada para ajudar a avaliar a eficácia e fornecer subsídios para a análise de compensações das ações de resposta, e orientar a

avaliação de lesões após um derramamento. (BARKER et al., 2020).

Tendo em vista o caso de derramamento de óleo que ocorreu em 2019, este estudo teve como objetivo avaliar e validar numericamente a percolação e o potencial contaminante de derivados do petróleo em meios porosos, além de verificar o alcance da percolação do óleo de na direção radial que leva em consideração os desastres da superfície e axial que considera os desastres da subsuperfície e das águas subterrâneas. Foi levado em consideração as propriedades físicas dos óleos, como densidade e viscosidade, granulometria e saturação da areia, com o intuito de avaliar o comportamento dos contaminantes do petróleo e seus derivados, em diferentes ambientes deposicionais e sua capacidade de se difundir em meios porosos, de acordo com o tempo de exposição.

As simulações numéricas foram realizadas no *software* OpenFOAM a partir das resoluções da equação de Darcy- Forchheimer a qual descreve o fluxo através do meio poroso. A validação numérica foi realizada a partir da calibração dos valores de “D” para lei de Darcy e “F” para equação de Forchheimer a qual tiveram como intuito a variação desses parâmetros para que o estudo estabeleça valores encontrados no experimental. Com os determinados ajustes para os parâmetros “D” e “F” o estudo pode ser utilizado em casos vindouros de derramamento.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar numericamente a percolação de derivados de petróleo em meios porosos, observando a influência de propriedades físicas do fluido e do meio no fenômeno.

2.2 Objetivos Específicos

- Validar numericamente a influência da viscosidade e densidade dos derivados de petróleo na percolação em leito granular;
- Avaliar numericamente o comportamento da percolação do óleo de forma radial e axial;
- Analisar a relação da equação de Darcy- Forchheimer com o escoamento do fluido em meios e porosos e a influência dos parâmetros D e F relacionando-os com os comportamentos radiais e axiais.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Meios Porosos

Os meios porosos são materiais sólidos, de origem sintéticas ou naturais que possuem em sua composição um conjunto de poros, que são tipicamente preenchidos com fluido. As dimensões dos espaços vazios, ou poros, seguidos pelos fluidos em escoamentos dependem de fatores variáveis, os quais podem ser citados: dimensão da partícula, esfericidade, forma geométrica e a rugosidade de sua superfície. Dessa forma os meios porosos podem ter propriedades topográficas e morfológicas muito diferentes, com base na organização interna dos poros. (RUBENSTEIN; D. FRAME; YIN, 2015)

A velocidade linear que o fluido passa por meio dos espaços vazios é de complexa determinação de forma direta. Tal dificuldade se dá ao fato das partículas dos meios porosos serem arranjadas de forma aleatória. Dessa forma pode-se referir que a capacidade do meio para permitir o escoamento do fluido através dos poros interconectados é definido como permeabilidade. A definição de permeabilidade é encontrada na lei que rege o deslocamento do tipo monofásico, conhecida por Lei de Darcy. A lei de Darcy de forma generalizada aponta que a permeabilidade e o gradiente de pressão são proporcionais a velocidade de avanço do fluido homogêneo em um meio poroso, e inversamente proporcional à viscosidade. Dessa forma podemos expressá-la em função da velocidade aparente " v_a " (superficial) e da velocidade efetiva " v_e " (intersticial) do trecho em que foi percorrido.

De acordo com Carman (1937), a resistência do fluido ao escoamento em meios porosos está diretamente relacionada com a quantidade de partículas presentes, ou com a concentração de sólidos onde pode ser utilizado em termos da porosidade do meio. Quando o meio poroso está preenchido por sólidos, onde a porosidade é zero, a resistência ao escoamento se torna infinita. Porém por outro lado, quando não se tem nenhum sólido e a porosidade é unitária, a velocidade intersticial será a mesma da velocidade superficial. Por definição tem-se que " v_a " é dada pela Equação 01 e a velocidade efetiva é dada pela Equação 02.

$$v_a = \frac{Q}{A} \tag{01}$$

$$v_e = \frac{Q}{\emptyset A} \tag{02}$$

Sendo, Q a vazão, A seção transversal e ϕ a porosidade.

3.2 Percolação de fluidos em meios porosos

De acordo com França (2000), o escoamento de um fluido através de um sistema permeável, denomina-se infiltração ou percolação. Este escoamento, um fenômeno isotrópico e sensivelmente homogêneo, ocorre em materiais constituídos de um conjunto de partículas sólidas que deixam entre si espaços vazios que poderão estar parciais ou totalmente preenchidos por um fluido. A dispersão da umidade no meio poroso ocorre nas fases, sólida, líquida e gasosa. Porém estas fases também podem-se apresentar de formas simultâneas, onde a fase líquida é a que aparece com mais frequência na natureza. O material poroso pode se tornar úmido de maneira natural quando submetidos a condições como chuva, neve, contato do ar ambiente e por capilaridade quando submerso.

3.3 Percolação de contaminantes no solo

Do latim *percolatio* surgiu o termo percolação, que significa filtragem, em outras palavras refere-se à capacidade do solo permitir os escoamentos de um percentual do líquido vazado. Diz-se que solos com mais espaços vazios (porosos) tendem a deter menos o líquido, ou seja, permitem que o fluido passe pelo solo mais livremente, ao contrário daqueles cuja porosidade é menor os quais dificultam o escoamento do contaminante (FOGAÇA et al,2014).

Dessa forma, se torna a necessidade de um estudo detalhado para determinação das características da percolação de fluidos em solos de estruturas porosas, no intuito de descrever e prever a migração de contaminantes de óleo no solo (YU et al., 2020).

Os processos de contaminação no solo ocorrem lentamente e, com uma enorme frequência, sem consequências trágicas imediatas, porém em longo prazo, podem ter efeitos sérios e possivelmente irreversíveis (DEMUELENAERE,2004). Em casos de derramamento de óleo, o ambiente em que ocorreu é colocado em risco. O tipo do ambiente afeta diretamente a permeabilidade, a mobilidade dos sedimentos e assim interfere no tempo de permanência do óleo no meio. Além do mais, é estabelecida uma relação direta entre a permeabilidade do substrato e o alcance de infiltração. Com o estudo apropriado de onde ocorreu o derramamento de óleo, podem ser aplicadas algumas técnicas de remediações com objetivo de controlar as contaminações presentes e futuras.

3.4 Mecânica do fluido

3.4.1 Equação da Continuidade

De acordo com a lei conservação de massa, podem-se afirmar que uma determinada quantidade física não pode simplesmente ser formada ou destruída. Dessa forma a mesma deve se manter conservada. No ramo da Física, uma equação de continuidade é uma expressão o transporte de uma determinada quantidade de massa. Equações desse modelo costuma ser mais forte do que uma lei de conservação, pois não se trata de conservação global e sim local. Essa equação estabelece que uma grandeza não pode se deslocar aleatoriamente em um sistema mesmo que essa respeite a lei de conservação, mas sim que ela deve se deslocar de modo contínuo. Desse modo baseado no princípio da conservação de massa temos que a equação da continuidade em sua forma integral, quando aplicada a uma distribuição homogênea em um volume de controle e cujos escoamentos nas seções de entrada e saída do fluido sejam uniformes, pode ser definida pela Equação 03:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial vx}{\partial x} = 0 \quad (03)$$

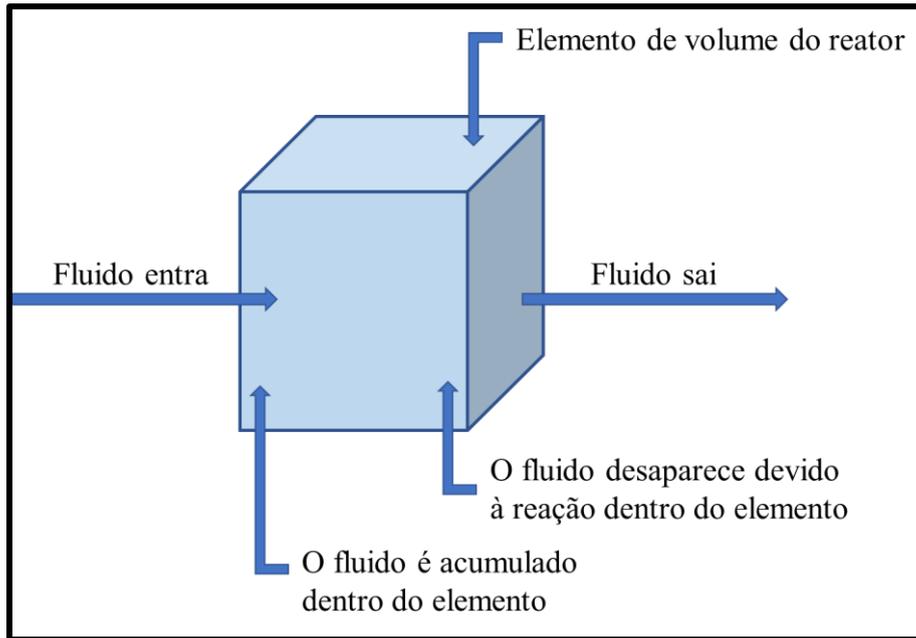
Onde,

ρ é a massa específica ($\frac{kg}{m^{-3}}$)

t é o tempo.

Na Figura 1 é possível observar a imagem de um balanço de massa para um elemento de volume.

Figura 1- Balanço de massa para um elemento de volume.



Fonte: Autora, 2023.

3.4.2 Equações de Navier-Stokes

Nos anos de 1845 e 1923 George Gabriel Stokes e Claude Louis Marie Henri Navier, apresentaram em seus trabalhos as equações de Navier- Stokes, ondem ambas surgiram a partir da segunda Lei de Newton, que aborda sobre o princípio fundamental onde afirma que uma força resultante que atua sobre um determinado corpo é igual ao produto da sua massa pela aceleração. Quando se fala sobre fluidos newtonianos em escoamentos isotérmicos, podemos desprezar os efeitos da compressibilidade, dessa forma podemos definir as equações em forma tensorial pela Equação 04:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] \quad (04)$$

Onde,

u_i é a velocidade local (forma tensorial) [$L T^{-1}$]

u_i são as direções ortogonais no espaço (forma tensorial) [L]

ρ é a massa específica [$M L^{-3}$]

g_i é a aceleração relativa às forças de campo [$L T^{-2}$]

μ é a viscosidade dinâmica do fluido [$M L^{-1} T^{-1}$].

As equações de Navier- Stokes relacionam as forças que agem no escoamento com as variações das velocidades das partículas no tempo e espaço. Na equação (4) podemos observar o que foi citado, onde para as forças os valores se encontram depois da igualdade e para velocidade antes do sinal. Apesar da equação ser resumida e dos dados serem claros, a utilização dessa não é algo simples, soluções analíticas levaram vários anos para serem encontradas em alguns casos, sendo elas para geometrias simples ou com condições muito próprias de escoamento.

Fortuna (2012, p. 24) citou que existem algumas objeções para encontrar as soluções analíticas, e essas decorrem do fato que a equação de Navier- Stokes são diferenciais parciais não lineares, as chamadas EDPs, e a teoria matemática revela que equações dessa classe ainda não estão suficientemente desenvolvidas para obter soluções analíticas em regiões arbitrárias e de condições de contorno em geral.

3.4.3 Equação da difusividade

Segundo Rosa (2006) e Ahmed (2006) a equação da difusividade relaciona a pressão no interior de um reservatório com o tempo, onde será função da porosidade da rocha, compressibilidade total do sistema, viscosidade do fluido e da permeabilidade relativa ao fluido. Nas engenharias a equação da difusividade hidráulica é atingida a partir da união de três equações, que são elas: a da continuidade que trata a conservação da massa, compressibilidade para o caso dos líquidos, e a lei de Darcy que se trata de uma equação de transporte de massa. Pode-se representar a Equação 5 da difusividade hidráulica por:

$$\frac{1}{\eta} \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \quad (05)$$

Onde,

η é a constante de difusividade hidráulica, representado na Equação 6, é calculado a partir de:

$$\eta = \frac{K}{\phi \mu_{ct}} \quad (06)$$

K é a permeabilidade absoluta (m/s)

ϕ é a porosidade

μ é a viscosidade (m²/s)

c_t é a compressibilidade total.

A equação acima assume somente um fluido saturando o meio poroso.

3.4.4 Abordagem Euleriana

A abordagem Euleriana é uma das mais utilizadas em simulações. Nesse tipo de abordagem multifásica, as fases são tratadas como contínuas e interpenetráveis, onde a fase sólida é considerada como contínua, ao levar em consideração, essa fase particulada é definida pelo diâmetro médio das partículas que a compõe, pelo coeficiente de restituição, pela densidade e pela fração volumétrica, onde é realizada uma média do movimento na escala das partículas a qual a solução numérica é alcançada por meio de equações diferenciais, tendo como base os princípios conservativos de massa, energia e quantidade de movimento para ambas as fases. Normalmente, o material particulado assume o comportamento de um fluido, o que permite chamar esse tipo de abordagem de Modelo de Dois Fluidos (VAN WACHEM et al., 2001; CHIESA et al., 2005; NASCIMENTO, 2018).

Para representar o escoamento de interesse de uma modelagem Euleriana, geralmente são examinados a viscosidade granular, onde essa determina as interações sólido-sólido, e as condições de contorno, que irão modelar as interações sólido-fluido e parede. No desenvolvimento de uma modelagem Euleriana para representação de um escoamento de interesse, utilizando a Fluidodinâmica Computacional (CFD), torna-se possível determinar as condições de contorno e encontrar o melhor modelo para que a abordagem Euleriana reproduza os resultados que foram obtidos experimentalmente. (VAN WACHEM et al., 2001; CHIESA et al., 2005).

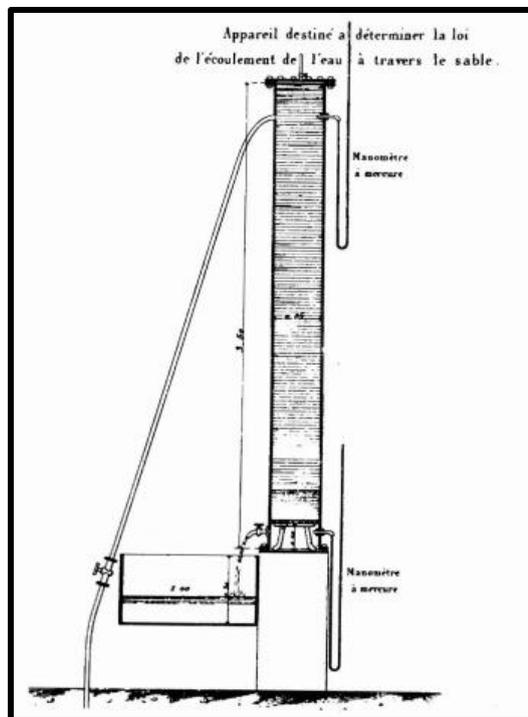
3.5 Escoamento Darcyano

3.5.1 Lei de Darcy

Henry Philibert Gaspard Darcy contribuiu para um dos estudos mais importantes de escoamentos em meios porosos. Dessa forma Darcy começou a fazer experimentos compostos

de duas etapas. Onde na primeira etapa dos ensaios foram feitos em quatro séries em uma coluna vertical, cada um com um grau de compactação de areia e com vazões variadas. Já na segunda etapa foram feitos cerca de 35 ensaios realizados com o mesmo grau de compactação, porém mudando a carga hidráulica. Dessa forma Darcy notou através das suas experiências que havia uma relação direta entre a vazão que penetrava uma amostra de zona porosa e a diferença de carga hidráulica associada, a qual estava submetida, onde ele encontrou uma dependência diretamente proporcional com a permeabilidade do meio poroso e inversamente proporcional à viscosidade do fluido. Na Figura 2 é visto onde as cargas hidráulicas foram parametrizadas por meio de manômetros de mercúrio.

Figura 2- Ilustração de Darcy da coluna vertical (*Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*).



Fonte: *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*, 1856.

A Lei de Darcy (1856) tem sido amplamente utilizada para descrever o escoamento de fluidos em meios porosos, é representada em termos modernos por meio da Equação 7:

$$Q = K \cdot \frac{\Delta h}{L} \cdot A \quad (07)$$

Onde,

Q Vazão em (m³/s)

K Coeficiente de permeabilidade do solo em (m/s) e

L Comprimento (m)

A Área transversal a amostra de solo (m^2).

Na equação 8 ainda pode-se observar sua forma reescrita utilizando o conceito de gradiente hidráulico (i):

$$Q = K \cdot i \cdot A \quad (08)$$

Onde, $i = \frac{\Delta h}{L}$. Podemos entender como o gradiente hidráulico a carga que se dissipa ao longo da percolação.

De acordo com Kraft & Yaakobi (1966) a lei de Darcy é apenas uma solução de estado estacionário da equação do momento em um meio poroso e não é uma equação constitutiva independente quando relacionada com o gradiente de pressão e o fluxo do fluido. Foi aceito como válido para uma certa faixa de fluxos aparentes e algumas suposições básicas para o fluxo de fluidos em meios porosos. Essas suposições básicas para a validade da lei de Darcy são as seguintes: fluxo monofásico laminar, condição isotérmica, viscosidade constante do fluido e nenhuma interação rocha-fluido.

3.6 Escoamento Não Darcyano

3.6.1 Lei de Forchheimer

Forchheimer (1901a, 1901b), estudou e propôs uma lei para modelar o caráter não linear do escoamento em meios porosos, que foi nomeada Lei de Forchheimer, e atualmente pode ser por meio da Equação 9:

$$i = aq + bq^2 \quad (09)$$

Onde,

a Coeficiente linear de Forchheimer [$L^{-1} T$]

b Coeficiente quadrático de Forchheimer [$L^{-1} T$] e

q Velocidade média (macroscópica) do escoamento [$L^{-1} T$].

Forchheimer propôs a Equação 9 de acordo com métodos semiempíricos, baseando-se

em resultados relatados pelos pesquisadores e nas mais recentes leis empregadas na hidráulica de condutos forçados para velocidades elevadas as quais são regem os escoamentos turbulentos (SCHEIDEGGER, 1960). A Lei de Forchheimer muito se assemelha com a Equação (10) de Prony (1804), criada quase 100 anos antes, para condutos livres e forçados. De certo modo, ela é uma extensão, para velocidades elevadas, e possui similaridade entre escoamentos em tubos e em meios porosos que foi anteriormente estudada por Darcy (1856). É possível observar que, para valores baixos de q , $bq^2 = 0$. Dessa forma, a Lei de Forchheimer se torna igual à proposta por Darcy, onde $a = \frac{1}{k}$. Na Figura 3, podemos observar uma comparativo entre a lei de Darcy (1856) e Forchheimer (1901a, 1901b).

$$\Delta h = \frac{1}{D} (a_p + b_p q^2) \quad (10)$$

Onde,

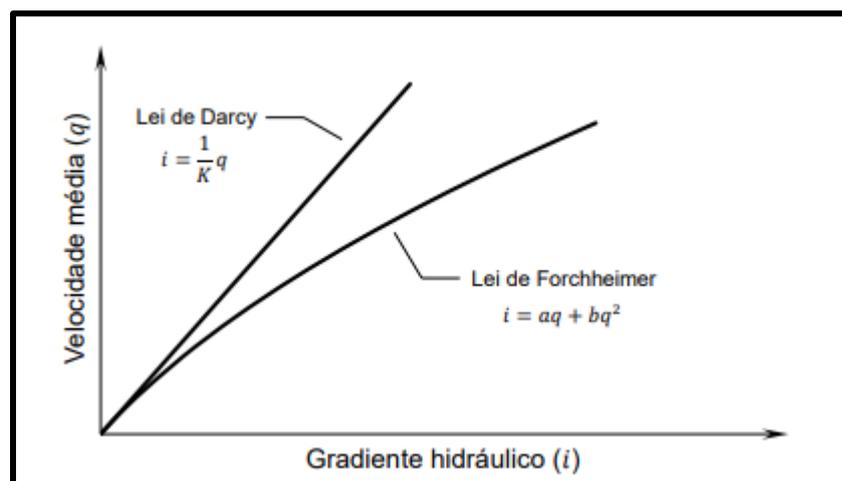
Δh é a diferença de pressão [L]

D diâmetro [L]

a_p coeficiente linear de Prony [T] e

b_p o coeficiente quadrático de Prony [$L^{-1} T^2$].

Figura 3- Gráfico comparativo entre as Leis de Darcy e Forchheimer.



Fonte: Lofrano,2018.

3.6.2 Fator Beta ou Coeficiente de Forchheimer

De acordo com GÓMEZ (2013) o coeficiente beta de Forchheimer determina a importância do desvio de um fluxo em relação ao regime linear de Darcy. Normalmente o fator beta é assumido como uma constante e é obtido ao manipular a equação de Darcy-Forchheimer onde obtém-se a seguinte Equação (11):

$$\frac{\nabla p}{\mu u_f} = \frac{1}{K} + \beta \frac{\rho u_f^2}{\mu} \quad (11)$$

Onde,

∇p representa gradiente de pressão,

μ é a viscosidade dinâmica,

u_f é a velocidade de fluxo,

K permeabilidade.

Esta é a equação de uma linha reta, onde o coeficiente β é a inclinação e o inverso da permeabilidade intrínseca é o intercepto. A expressão adimensional da equação anterior é dada pela Equação 12:

$$\frac{\nabla p d^2}{\mu u_f} = \frac{d^2}{K} + d\beta Re \quad (12)$$

Onde,

d é o diâmetro médio do grão.

Quando calculado, o fator beta é identificado com os dados de velocidade e gradiente de pressão para variados números de Reynolds. Beta é uma propriedade do meio poroso e é constante no regime de Forchheimer.

3.7 Fluidodinâmica computacional

A Fluidodinâmica Computacional também conhecida por CFD (Computational Fluid Dynamics), trata-se de uma área de conhecimento que envolve a simulação numérica de escoamentos de fluidos, transferência de calor e todos os fenômenos relacionados e as reações

químicas envolvidas.

O CFD ganhou destaque no início dos anos 1960. Atualmente ele é muito utilizado em pesquisas básicas e aplicadas, em projetos de engenharia, cálculos de fenômenos ambientais, geofísicos, entre outros. Durante os estudos observou que as leis que regem os transportes na fluidodinâmica computacional são as seguintes (DATE, 2005):

1. A Lei da Conservação da massa (Transporte de Massa),
2. A segunda Lei de Newton (Quantidade de Movimento),
3. A primeira lei da termodinâmica (Transporte de Energia).

As equações que governam esses escoamentos têm origem na mecânica dos fluidos e podem ser solucionadas por diferentes métodos numéricos. A principal equação resolvida via CFD é a de Navier- Stokes, que é uma equação de transporte da variável de interesse, representa por ϕ . Na Figura 4 é apresentado o modelo da Equação:

Figura 4- Equação de Navier-Stokes resolvidas via CFD.

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi \partial V}_{\text{Tempo}} + \underbrace{\oint_A \rho \phi V \cdot \partial A}_{\text{Advectivo}} = \underbrace{\oint_A \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot \partial A}_{\text{Difusivo}} + \underbrace{\int_V S_\phi \partial V}_{\text{Fonte}}$$

Fonte: Autora, 2022.

Qualquer equação resolvida em CFD possuem esse formato acima, onde existem quatros termos que são eles: tempo, advectivo, difusivo e o termo de fonte. Para equações de conservação apenas três termos são alterados: o coeficiente de difusão (Γ), a variável (ϕ) e o termo fonte (S).

Quando se trabalha com a equação da continuidade, a variável (ϕ), recebe o valor igual a 1, já a fonte e o coeficiente de difusão são nulos. Apesar dessa fórmula ser muito utilizada para aplicações em CFD, é certo que até o momento não existe solução analítica para a equação citada acima. Dessa forma, é preciso reescrevê-la em forma algébrica e resolvê-la por meio de métodos de discretização.

Os métodos de discretização mais usados são:

- Método das diferenças finitas;
- Método dos elementos finitos;

- Método dos volumes finitos.

Esses métodos utilizados para as resoluções de escoamentos têm como objetivo:

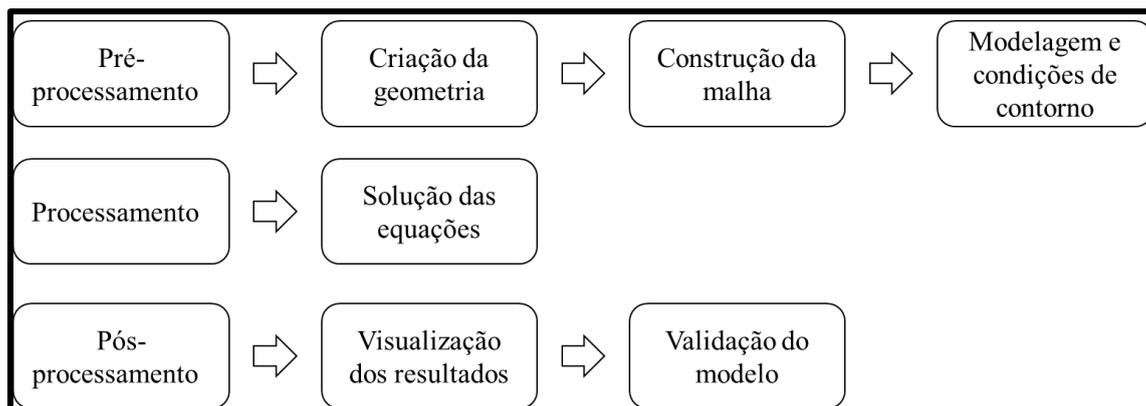
- Solução de escoamentos sobre geometrias complexas;
- Conservação das propriedades do fluído localmente;
- Economia de tempo computacional.

Com a utilização desses métodos, o domínio contínuo é alterado por um domínio discreto, onde um conjunto de volumes de controle é utilizado para representar o domínio inicial. A forma algébrica da equação é solucionada em cada um dos volumes de controle, criando um sistema de equações que deve ser resolvido numericamente. O número de volumes de controle a ser usado para a análise deve ser definido por meio do estudo de convergência de malha, melhor dizendo, o caso é analisado com malhas de diferentes refinamentos e comparado com os resultados. Quando o resultado entre dois refinamentos de malha não recebe alteração (ou pouca), pode-se afirmar que a convergência de malha foi atingida.

Após a geração da malha, é passado para etapa de configuração da física do modelo, que são elas: condições de contorno e dos *solvers* (resolvedores). Concluindo essa fase, estabelece o sistema de equações através de um processo iterativo, até a convergência, ou seja, quando os resultados entre duas iterações consecutivas variarem e se encontrarem em um valor abaixo de um critério estabelecidos pelo usuário.

A última etapa é chama de pós-processamento, onde os resultados podem ser avaliados por meio vetores, planos de corte, distribuições de cores, entre outros. Na Figura 5 podemos observar de forma sucinta as etapas de uma simulação CFD.

Figura 5- Etapas utilizadas durante a simulação CFD.



Fonte: Autora, 2022.

3.7.1 Pré-processamento

De acordo com ARAUJO (2020) a etapa de pré-processamento constitui na entrada de um problema de escoamento em um programa CFD, por meio de uma interface com o usuário e em seguida a transformação desta entrada em uma forma apropriada para o uso do solver.

Segundo Bezerra (2018) e Chiesa et al. (2007), as subetapas do pré-processamento são constituídas da seguinte forma:

- Definição da geometria da região de interesse (domínio);
- Geração da malha (a subdivisão do domínio em um número determinado de células): uma malha de volumes de controle);
- Seleção dos fenômenos físicos ou químicos que precisam ser modelados;
- Definição das propriedades do fluido;
- Especificação das condições de contorno;
- Especificação dos parâmetros numéricos.

3.7.2 Solver

O solver é o elemento responsável por resolver o problema de CFD, elaborando os resultados solicitados, em um processo não-interativo com o usuário. De acordo com Chiesa et al. (2007) e Maitelli (2010), a resolução dos problemas de CFD utilizando o solver ocorre da seguinte forma:

- Em todo o volume de controle e região de interesse são integradas equações diferenciais parciais;
- Equações integrais são modificadas para um sistema de equações algébricas, gerando um jogo de aproximações para os termos nas equações integrais;
- As equações algébricas são resolvidas iterativamente.
- É produzido um arquivo de resultados é criado, onde esse é transferido e utilizado para etapa de pós-processamento.

3.7.3 Pós-processamento

Essa etapa constitui-se na utilização da solução do solver por um pós-processador, o qual é usado para visualizar, analisar e apresentar os resultados. Dessa forma, essa etapa apresenta as visualizações diversas de malha e geometria inclui desde a obtenção de valores em pontos específicos a animações complexas, como também a visualização do sentido e do valor do fluxo de um escoamento, a variação da temperatura, velocidade e pressão, além de animações gráficas, traço de vetores, informações sobre malha, linhas e contornos e superfícies 2D/3D (BEZERRA, 2018).

3.7.4 Malha Computacional

A criação da malha computacional é um passo muito importante na solução de um modelo computacional, pois o número de células interfere diretamente na precisão dos resultados obtidos, bem como no tempo de simulação e no esforço computacional. Dessa forma, a determinação da malha deve ser feita corretamente, pois a má determinação da mesma poderá ocasionar, uma simulação com resultados incoerentes (ANTONIACOMI e SOUZA, 2010).

De acordo com Duarte (2006), as etapas para a construção desse tipo de malha ocorrem da seguinte forma:

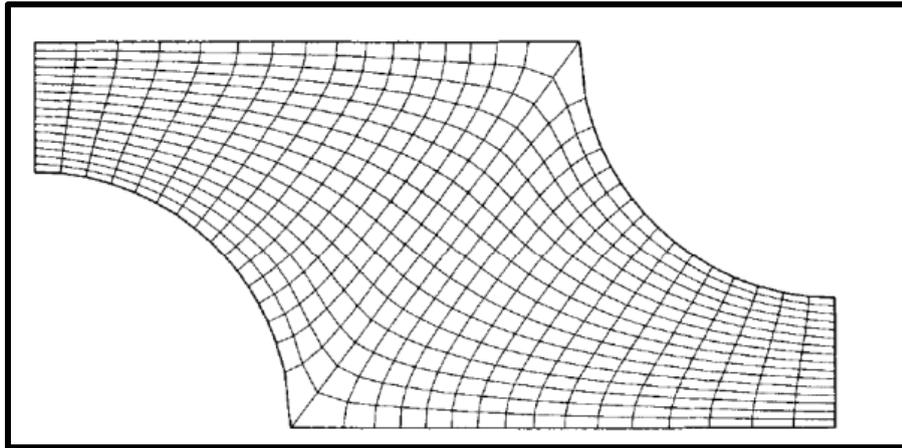
- Construção da geometria do modelo a ser estudado;
- Definição das faces e/ou volumes;
- Determinação de efeitos como camada limite ou outro tipo de refinamento desejado;
- Aplicação da malha no corpo geométrico construído e definição do tipo e tamanho das células (quadrangular, tetraédrica, hexaédrica ou híbrida);
- Identificação das paredes, interiores, entradas e saídas do equipamento;

- Determinação das fases que compõem o interior da geometria, onde pode ser constituída por fluido ou sólido.

3.7.4.1 Processo de Discretização

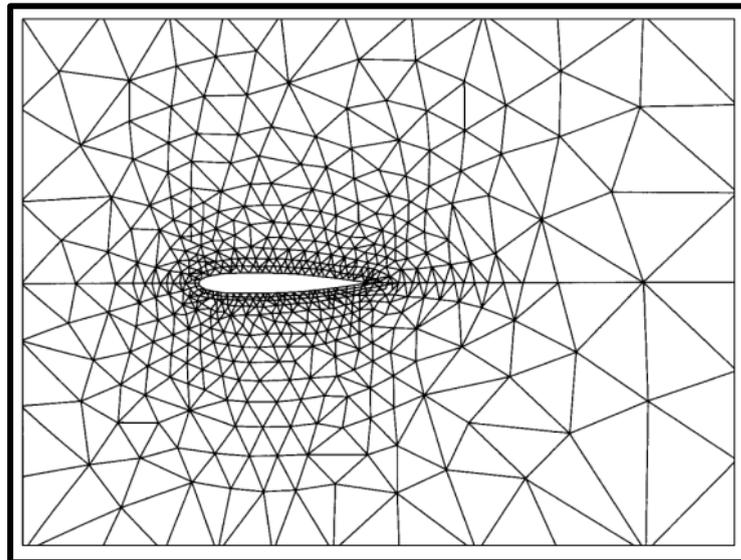
Os métodos de discretização aproximam as equações diferenciais como um conjunto de equações algébricas variáveis para locais e tempos discretos. Existem várias formas de discretizar as equações de um modelo matemático, sendo as mais relevantes o método das diferenças finitas, o método dos volumes finitos e o método dos elementos finitos. Se a malha numérica discretizada for muito fina, todos os métodos produzirão aproximadamente a mesma solução, mas alguns métodos podem ser mais convenientes para determinados problemas. As variáveis são avaliadas em posições numéricas definidas, que são representações discretas do domínio geométrico da solução do problema. A malha divide o domínio da solução em um número finito de subdomínios, onde alguns exemplos deles são os: elementos, volumes de controle, entre outros. No caso de geometrias mais complexas as malhas são organizadas em blocos, com diferentes níveis de divisão e domínio, já para as geometrias mais simples são utilizadas as malhas estruturadas que são formadas por famílias de linhas, onde as linhas que são componentes da mesma família não se cruzam entre si, e se cruzam apenas uma vez com os membros pertencentes as outras famílias. Na Figura 6, podemos observar uma malha estruturada a qual as linhas não se interceptam. Já na Figura 7, a malha apresenta um aspecto mais desestruturada, onde malhas desse tipo são mais utilizadas em geometrias mais complexas utilizando qualquer um dos esquemas de discretização das equações, porém ela é mais adequada para o esquema de elementos finitos ou de volumes finitos.

Figura 6- Modelo de uma malha estruturada em 2D.



Fonte: Ferziger & Peric, 2001.

Figura 7- Modelo de uma malha triangular desestruturada em 2D.



Fonte: Zienkiwicz et al., 2005^a.

3.7.5 Métodos Numéricos

Grande parte das geometrias e problemas, as equações diferenciais parciais não podem ser resolvidas com abordagens analíticas. Em vez disso, podemos aproximar essas equações usando métodos de discretização que podem ser resolvidos usando métodos numéricos. Os principais métodos numéricos são os de volume e elementos finitos.

O método dos volumes finitos é amplamente utilizado em fluidodinâmica computacional devido à sua simplicidade conceitual e facilidade de implementação em malhas arbitrárias, estruturadas ou não. O domínio da solução é subdividido em um número finito de volumes de controle, e as equações de conservação são aplicadas a cada volume de

controle em sua forma integral. Os valores das variáveis são computados no baricentro de cada volume de controle, onde existe um nó computacional. A interpolação é usada para representar valores variáveis em superfícies de volume de controle com valores nodais. As integrais de volume e superfície são aproximadas usando fórmulas de quadratura adequadas para obter equações algébricas para cada volume governante. O método dos volumes finitos pode ser usado com qualquer tipo de malha e, portanto, com qualquer geometria. Neste caso, a malha apenas define o contorno do volume de controle e não precisa estar relacionada a nenhum sistema de coordenadas. Esse método de construção é considerado conservativo, desde que as integrais de superfície que representam o fluxo convectivo e difusivo sejam as mesmas para os volumes de controle que compartilham um contorno. O método de volumes finitos requer três níveis de aproximação, que são elas: diferenciação, interpolação e integração, o que faz com que seja difícil desenvolver métodos em 3D de terceira ordem ou superior (HIRSCH, 2007).

O método dos elementos finitos possui muita similaridade com método dos volumes finitos pois eles são aproximadamente equivalentes no caso de polinômios de baixa ordem. Os pontos que se destacam em ambos os métodos são complementares, quando aplicados às equações de fluxo. Por tanto muitos esquemas híbridos têm sido propostos, em alguns casos funções de forma de elementos finitos podem ser usadas para interpolar os fluxos em um método de volumes finitos (Ferziger & Peric, 2001).

De acordo com Zienkiewicz et al. (2005b) esse método de aproximação subdivide um espaço ou domínio complexo em um número de partes pequenas, contáveis e finitas (de onde vem o nome elementos finitos) cujo comportamento pode ser descrito com equações comparativamente simples. A malha numérica geralmente é desestruturada, formada por triângulos ou quadriláteros em 2D e tetraedros ou hexaedros em 3D. Esse método foi desenvolvido para análise de engenharia no intuito de modelar e analisar sistemas complexos na engenharia mecânica, civil e aeronáutica. Os fundamentos do método podem ser derivados das leis do movimento de Newton, da conservação de massa e energia e das leis da termodinâmica. Geralmente as equações desse método são multiplicadas por uma função de ponderação antes de serem integradas sobre o domínio total. De forma mais simples a solução em cada elemento é aproximada por uma função de interpolação linear de forma, de modo que se garanta a continuidade ao longo do contorno do mesmo.

O método dos elementos finitos possui grandes benefícios em sua utilização, uma delas é a capacidade para lidar com geometrias arbitrárias e a literatura dedicada à construção de malhas é longa Zienkiewicz et al. (2005b). Esse método é de fácil análise matemática, além de possuir propriedades excelentes para tratar alguns tipos de equações.

3.8 Utilização da simulação numérica nas técnicas de remediação em áreas atingidas por derramamento de óleo

Quando ocorrem acidentes devido ao derramamento de óleo os problemas são generalizados devido à sua vasta produção em nosso cotidiano. Em casos de derramamento de óleo na superfície terrestre, é necessária uma ação eficaz de controle a fim de evitar níveis altos de contaminação da vegetação e das águas subterrâneas e superficiais.

A simulação numérica prevê o comportamento do derramamento do óleo, e vem ocupando cada vez mais um papel importante na atualidade. A modelagem operacional de derramamento de óleo conta com as previsões de trajetória no intuito de determinar a localização atual e futura do derramamento. Os centros de modelagem precisam fornecer informações sobre a localização e o estado do óleo para os respondentes usarem no planejamento de equipamentos e necessidades de pessoal. Em todo o mundo, existem centros operacionais de resposta a derramamentos de óleo com foco em modelagem, tanto em centros de grande escala quanto em países ou regiões individuais (BARKER et al., 2020).

Além das principais previsões do destino e transporte do derramamento, a modelagem também pode ser usada para ajudar a avaliar a eficácia e fornecer subsídios para a análise de compensações das ações de resposta. As modelagens numéricas são usadas de diversas maneiras, entre elas podemos citar: auxílio no planejamento, análise de impactos ambientais, tomadas de decisões e avaliações de danos. Os resultados obtidos pelos modelos matemáticos podem ser gerados em gráficos e mapas para aplicar medidas para conter o derramamento. Esses resultados podem constatar as principais áreas de risco e auxiliar as ações a serem tomadas. (BARKER et al., 2020).

3.9 Modelo Darcy-Forchheimer

O modelo Darcy-Forchheimer é o utilizado pelo *software* OpenFoam (*Open Source Field Operation and Manipulation*) para a compreensão do fluxo de um fluido em meio poroso. De acordo com Wang et.al (2019) o OpenFOAM é um *software* em C++, utilizado nos mais

diversos campos de pesquisas e aplicações industriais, além de resolver problemas de mecânica de meios contínuos incluindo problemas de dinâmica dos fluidos computacional (CFD).

O modelo de Darcy-Forchheimer utilizados pelo OpenFOAM é dado pela Equação (13):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma p u_i) + u_j \frac{\partial}{\partial x_j}(p u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial t_{ij}}{\partial x_j} + S_i \quad (13)$$

Onde γ é a porosidade. O termo fonte (sorvedouro) S_i , dado pela equação de Darcy-Forchheimer é composto por dois termos, onde o primeiro é a perda viscosa e o segundo a perda inercial. A Equação (14) demonstra o termo fonte utilizado no estudo.

$$S_i = -(\mu D + \frac{1}{2} \rho |u_{jj}| F) u_i \quad (14)$$

A relação entre a queda de pressão e a velocidade é dada conforme a equação de Forchheimer trazida na Equação (15):

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{\mu}{k_1} u + \frac{\rho}{k_2} u^2 \quad (15)$$

A queda de pressão é dada por Δp em relação a velocidade u em um meio poroso de comprimento L .

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Com base em estudos prévios sobre a percolação do óleo em solos arenosos no litoral alagoano e, a partir dos resultados encontrados experimentalmente foi realizada a validação numérica através do *software* OpenFOAM.

4.1 Aparato Experimental para análise da simulação

Os ensaios experimentais para estudo da percolação do petróleo foram realizados no Laboratório de Sistemas de Separação de Otimização de Processos (LASSOP) localizado no Centro de Tecnologia (CTEC) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), os quais foram realizados por Doria (2022). Foi utilizada uma tubulação de PVC com diâmetro interno de 14 cm e altura 10 cm (Figura 8), a qual foi preenchida com areia de forma gradual e com sobreposição de camadas para simular sua compactação natural. Por fim, foi realizado um

nivelamento para que não houvesse a formação de caminhos preferenciais do óleo derramado no meio granular.

Figura 8-Tubulação em PVC totalmente preenchido com areia sem umidade.



Fonte: Dória, 2022.

Foram utilizados 3 modelos de óleos do tipo lubrificantes para automóveis, os quais suas respectivas características físico-químicas podem ser analisadas na Tabela 1. Os óleos foram nomeados a partir das suas respectivas viscosidades.

Tabela 1- Características físico-químicas dos óleos lubrificantes.

| Característica | 5,73E-05 | 7,72E-05 | 1,64E-04 |
|--------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Viscosidade 25°C (cSt) | 57,31 | 77,23 | 163,6 |
| Viscosidade 40°C (cSt) | 47,6 | 64 | 134,7 |
| Viscosidade 100°C (cSt) | 8,75 | 11,1 | 19,1 |
| Índice de Viscosidade | 164 | 167 | 161,6 |
| Ponto de Fluidez (°C) | -18 | -45 | -18 |
| Densidade (g/cm ³) | 0,8505 | 0,852 | 0,88 |

Fonte: Adaptado Dória, 2022.

O escoamento do óleo foi realizado através de uma pipeta localizada no centro 5 cm acima da tubulação, com uma vazão de 5mL/min como pode ser visto na Figura 9, com intuito de analisar o comportamento de percolação (alcance) axial e radial.

Figura 9- Escoamento do óleo na tubulação com utilização da pipeta.



Fonte: Dória, 2022.

A percolação dos óleos foi realizada com três diferentes amostras de areia com diferentes diâmetros de partícula e em triplicata no tempo de 300 segundos. O alcance radial do óleo foi denominado D_{exp} e o alcance axial P_{exp} para os dados experimentais. As médias (\bar{x}) dos resultados de D_{exp} e P_{exp} podem ser observados na Tabela 2. Os dados dispostos foram utilizados na etapa de validação numérica.

Tabela 2- Dados da percolação dos óleos obtidos experimentalmente.

| Óleo lubrificante | Diâmetro da partícula _{Sauter} (μm) | | | | | |
|-------------------|---|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | 5,468 | | 5,0644 | | 3,063 | |
| | $\bar{x} D_{exp}$ (cm) | $\bar{x} P_{exp}$ (cm) | $\bar{x} D_{exp}$ (cm) | $\bar{x} P_{exp}$ (cm) | $\bar{x} D_{exp}$ (cm) | $\bar{x} P_{exp}$ (cm) |
| 7,72E-05 | 2,72 | 10 | 4,14 | 6,66 | 3,22 | 5,14 |
| 1,64E-04 | 3,23 | 6,49 | 4,39 | 5,53 | 4,21 | 4,29 |
| 5,73E-05 | - | - | - | - | 2,83 | 6,73 |

Fonte: Adaptado Dória, 2022.

Os dados apresentados na Tabela 2 serviram como base para a validação numérica, no intuito dos dados simulados obter valores iguais ou próximos dos experimentais.

4.2 Simulação Computacional

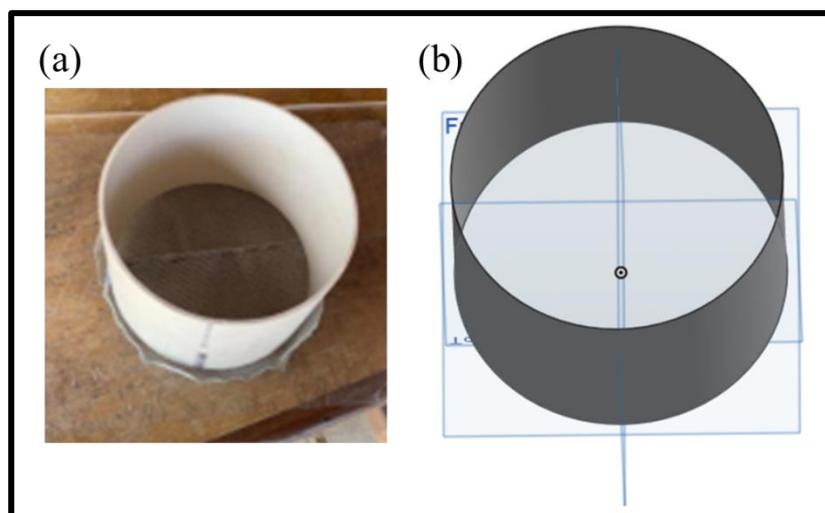
O *software* utilizado para a simulação computacional foi o OpenFOAM, desenvolvido

pela OpenCFD Ltd. É um *software* baseado em métodos numéricos que pode ser aplicado nas mais diversas áreas da engenharia. Possui uma ampla gama de recursos para resolver, desde fluxos de fluidos complexos envolvendo reações químicas, turbulência, até transferência de calor e mecânica dos sólidos. Além disso, também possui a opção que permite ao usuário criar seu próprio modelo ou otimizar os já existentes.

A versão utilizada do *software* neste trabalho encontra-se disponível no site da empresa para download (Versão v10). O processo de simulação consistiu nas três etapas principais: pré-processamento, processamento e pós-processamento.

A geometria do caso foi criada no software *OnShape* disponível de forma online e acessado por meio do site (<https://www.onshape.com/en/>). Foi desenhado geometria em 3D da tubulação e definido suas dimensões a partir do modelo feito no experimental proposto por Doria (2022) como apresentado na Figura 10, o modelo possui 14 cm de diâmetro e 10 cm de altura.

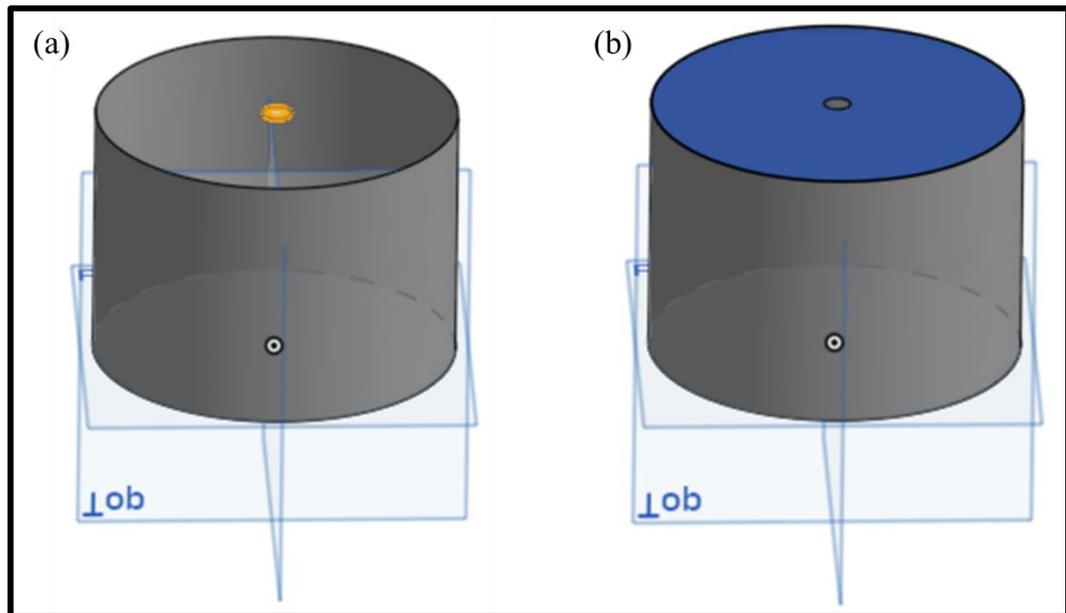
Figura 10- (a) Tubulação usada experimentalmente. (b) Tubulação simulada



Fonte: Autora, 2022.

Depois da geometria pronta, foram criadas duas superfícies (Figura 11): uma denominada “*inlet*” com 1 cm de diâmetro para ocorrer a simulação da entrada no óleo no interior da tubulação, e outra chamada “*outlet*” pois por se tratar de um problema multifásico (óleo, ar e areia) ao ocorrer a entrada do óleo no meio poroso o ar ali existente precisa sair.

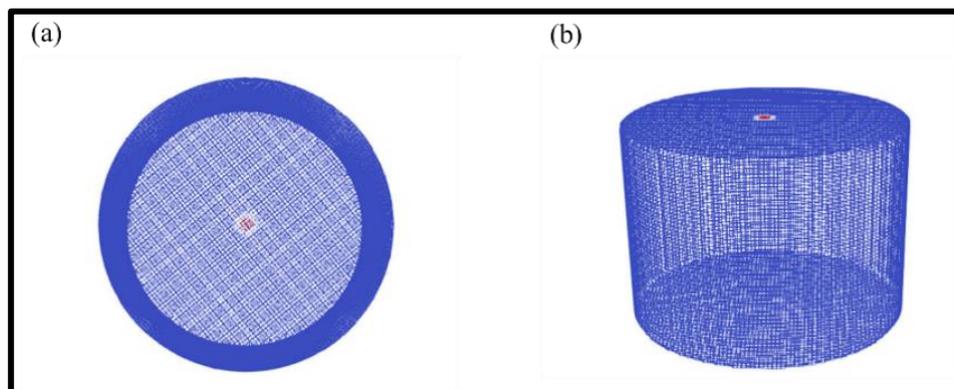
Figura 11- (a) Representação da superfície *inlet* e (b) *outlet*



Fonte: Autora, 2022.

No OpenFOAM a geração da malha é feita no arquivo *blockmesh* e refinada nas bordas e nos contornos da geometria, otimizada pelo próprio *software*, podendo ser extremamente grosseiras ou extremamente finas. A malha é responsável pela divisão da geometria em vários volumes, onde quanto maior o número de volumes, menor será o erro numérico associado. Dessa forma, a malha precisa ser refinada nas regiões do escoamento onde o gradiente da propriedade é alto. A construção da malha é uma etapa crítica para garantir que a simulação tenha uma boa convergência. Após testes preliminares a construção da malha foi gerada seguindo a metodologia do Y+ contendo em seu domínio 193.212 células. Na Figura 12 pode-se observar a geometria e a malha computacional utilizada.

Figura 12- (a) Vista superior da geometria com sua malha computacional. (b) Geometria computacional com sua determinada malha.



Fonte: Autora, 2022.

Para este trabalho, os parâmetros adotados para a simulação estão de acordo com os valores testados e determinados experimentalmente por Doria (2022), que serviram para a validação da simulação, onde podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3- Especificação dos óleos utilizados para simulação computacional

| Óleo lubrificante | ρ (Kg/m ³) | μ (m ² /s ²) | v (m/s) |
|-------------------|-----------------------------|---|----------|
| 5,73E-05 | 850,5 | 5,73E-05 | 1,06E-03 |
| 7,72E-05 | 852,0 | 7,72E-05 | 1,06E-03 |
| 1,64E-04 | 880,0 | 1,64E-04 | 1,06E-03 |

Fonte: Autora, 2022.

Para a realização da simulação foi escolhido um Time Step de 10^{-8} obedecendo o critério de convergência estabelecido em 1×10^{-4} . Todas as simulações foram realizadas para um tempo real de simulação de 300 segundos. Dentre as condições de contorno utilizadas, podem ser citadas:

- Velocidade de entrada do fluido;
- Tempo em que não ocorreu mais a entrada do fluido;
- Condição de contorno na fase líquida de não deslizamento nas paredes.

Levando em consideração os escoamentos Darcyanos e não Darcyanos, foram realizadas algumas mudanças nos parâmetros “D” e “F”, objetivando que a simulação obtenha um comportamento de acordo com os dados obtidos experimentalmente.

Tendo conhecimento que Darcy considera um escoamento laminar em um meio poroso, os dados do caso a ser simulado traz um arquivo onde é possível manipular os valores dos coeficientes de Darcy e Forchheimer. Na Tabela 4 pode-se observar os dados obtidos no arquivo do OpenFOAM que fornece algumas informações comentadas sobre os valores adotados ao parâmetro “D”.

Tabela 4- Informações para os valores de "D".

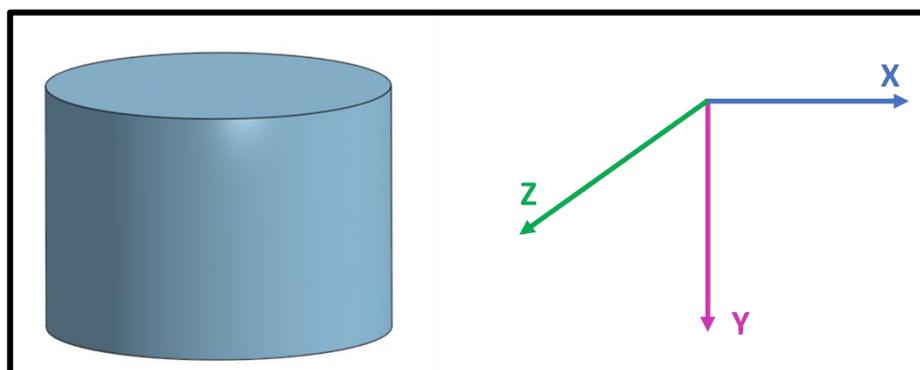
| Valores de D | Observações estabelecidas pelo OpenFOAM |
|--------------------|---|
| 100 | Zona com bloqueio para entrada de fluido |
| 200 | Bloqueio em alguma parte da zona porosa, mas ainda ocorre fluxo de fluido |
| 500 | Leves ondulações no meio poroso, ocasionando passagem do fluido |
| 1×10^{10} | Derramamento total do fluido |

Fonte: Adaptado do OpenFOAM, 2023.

Darcy considera que o meio deve ser isotrópico, porém os valores podem ser alterados para um meio anisotrópico, como é o caso a ser estudado, uma vez que o comportamento será diferente para as coordenadas. De acordo com Ferreira (2010) quando não for garantida a linearidade entre a velocidade aparente e o gradiente de pressão, originam-se os escoamentos “não-Darcyanos” que são ocasionados por altas velocidades, efeitos moleculares ou comportamento não-newtoniano do fluido. Nesses casos são criadas curvas cujo coeficientes são determinados experimentalmente. Assim Forchheimer sugeriu a inclusão de um termo de segunda ordem na equação de Darcy para esses tipos de escoamento.

Os parâmetros utilizados estão conforme a equação de Darcy os quais apresentam diferentes valores para cada coordenada, e que serão nomeadas D_x , D_y e D_z , já para os termos da equação de Forchheimer F_x , F_y e F_z . Devido a geometria utilizada nesse estudo apresentar o mesmo comportamento de fluido para as direções x e z, as coordenadas foram unidas e renomeadas. Onde D_{xz} representa a equação de Darcy em x e z e F_{xz} para Forchheimer. A Figura 13 traz a representação dos eixos de acordo com a geometria construída.

Figura 13-Representação das coordenadas de acordo com a geometria.



Fonte: Autora, 2022.

i. Avaliação Exploratória e primeiro planejamento composto central (PCC)

Para melhor determinação dos valores de D e F foram realizadas simulações exploratórias, avaliando os valores de D_{xz} e D_y correspondentes ao fenômeno estudado, para estabelecer valores aceitáveis em que o fluido escoasse sem gotejar no meio. Dessa forma foram realizadas avaliações no intuito de identificar qual variável influencia diretamente no escoamento do óleo em meios porosos. O óleo escolhido para essa avaliação exploratória a priori foi o de viscosidade $7,72E-05 \text{ m}^2/\text{s}^2$ no intuito de conhecer o caso, com um tempo de duração de escoamento de 300 segundos, as características do óleo podem ser observadas na Tabela 1 tópico 4.1. Com isso, foram determinados os valores mínimos e máximos para D_{xz} e D_y (Tabela 5), os quais foram determinados a partir simulações pioneiras que tiveram como objetivo o conhecimento da física do problema.

Tabela 5- Valores mínimos e máximos (log 10) para D_{xz} e D_y .

| Parâmetros | Mínimo | Máximo |
|----------------------------|---------------|---------------|
| D_{xz} | 7 | 22 |
| D_y | 6 | 23 |

Fonte: Autora, 2023.

Com auxílio do *software* Statistica (Versão 7) foi realizado um Planejamento Experimental do tipo Composto Central. Na Tabela 6 pode-se verificar os valores para D_{xz} e D_y para cada uma das condições a serem avaliadas.

Tabela 6- Planejamento composto central gerado com o *software* Statistica variando (D_{xz} e D_y).

| CASO | D_{xz} | D_y | CASO | D_{xz} | D_y |
|-------------|----------------------------|-------------------------|-------------|----------------------------|-------------------------|
| 1 | 1,00E+08 | 1,00E+08 | 14 | 1,00E+12 | 1,00E+08 |
| 2 | 1,00E+20 | 1,00E+08 | 15 | 1,00E+12 | 1,00E+20 |
| 3 | 1,00E+08 | 1,00E+12 | 16 | 1,00E+14 | 1,48E+14 |
| 4 | 1,00E+20 | 1,00E+12 | 17 | 1,00E+08 | 1,00E+09 |
| 5 | 1,00E+14 | 1,48E+07 | 18 | 1,00E+14 | 3,06E+23 |
| 6 | 1,00E+14 | 6,74E+12 | 19 | 3,27E+05 | 1,00E+15 |
| 7 | 3,27E+05 | 1,00E+10 | 20 | 1,00E+14 | 3,27E+06 |
| 8 | 3,06E+22 | 1,00E+10 | 21 | 1,00E+20 | 1,00E+21 |
| 9 | 1,00E+14 | 1,00E+10 | 22 | 1,00E+20 | 1,00E+09 |
| 10 | 1,00E+14 | 1,00E+10 | 23 | 1,00E+08 | 1,00E+21 |
| 11 | 1,48E+07 | 1,00E+14 | 24 | 1,00E+14 | 1,00E+15 |

| | | | | | |
|----|----------|----------|----|----------|----------|
| 12 | 6,74E+12 | 1,00E+14 | 25 | 3,06E+22 | 1,00E+15 |
| 13 | 1,00E+08 | 1,00E+20 | | | |

Fonte: Autora, 2023.

ii. **Segundo Planejamento Composto Central (PCC)**

Por meio do *software* Statistica (Versão 7) foi elaborado um novo planejamento Composto Central incluindo valores mínimos e máximos para (F_{xz}, F_y) no intuito de observar a mudança do escoamento do óleo quando essas variáveis, são adicionadas. Na Tabela 7 estão dispostos os valores dos pontos mínimos e máximos para cada parâmetro e suas respectivas combinações para as simulações (Tabela 8).

Tabela 7- Valores mínimos e máximos (log 10) para $(D_{xz}, D_y, F_{xz}$ e $F_y)$.

| Parâmetros | Mínimo | Máximo |
|------------|--------|--------|
| D_{xz} | 3 | 11 |
| D_y | 12 | 27 |
| F_{xz} | 3 | 13 |
| F_y | 4 | 13 |

Fonte: Autora, 2023.

Tabela 8- Planejamento composto central gerado com o *software* Statistica variando $(D_{xz}, D_y, F_{xz}$ e $F_y)$.

| CASO | Dxz | Dy | Fxz | Fy | CASO | Dxz | Dy | Fxz | Fy |
|------|----------|----------|----------|----------|------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 1,00E+05 | 1,00E+12 | 1,00E+03 | 1,00E+04 | 14 | 1,00E+09 | 1,00E+12 | 1,00E+03 | 1,00E+04 |
| 2 | 1,00E+07 | 1,00E+17 | 1,00E+18 | 1,00E+07 | 15 | 1,00E+05 | 1,00E+12 | 1,00E+13 | 1,00E+04 |
| 3 | 1,00E+05 | 1,00E+22 | 1,00E+13 | 1,00E+04 | 16 | 1,00E+07 | 1,00E+27 | 1,00E+08 | 1,00E+07 |
| 4 | 1,00E+09 | 1,00E+22 | 1,00E+03 | 1,00E+04 | 17 | 1,00E+11 | 1,00E+17 | 1,00E+08 | 1,00E+07 |
| 5 | 1,00E+05 | 1,00E+12 | 1,00E+03 | 1,00E+10 | 18 | 1,00E+07 | 1,00E+07 | 1,00E+08 | 1,00E+07 |
| 6 | 1,00E+07 | 1,00E+17 | 1,00E+08 | 1,00E+07 | 19 | 1,00E+05 | 1,00E+22 | 1,00E+13 | 1,00E+10 |
| 7 | 1,00E+07 | 1,00E+17 | 1,00E-02 | 1,00E+07 | 20 | 1,00E+05 | 1,00E+22 | 1,00E+03 | 1,00E+10 |
| 8 | 1,00E+05 | 1,00E+12 | 1,00E+13 | 1,00E+10 | 21 | 1,00E+09 | 1,00E+22 | 1,00E+13 | 1,00E+10 |
| 9 | 1,00E+09 | 1,00E+12 | 1,00E+03 | 1,00E+10 | 22 | 1,00E+07 | 1,00E+17 | 1,00E+08 | 1,00E+01 |
| 10 | 1,00E+07 | 1,00E+17 | 1,00E+08 | 1,00E+13 | 23 | 1,00E+09 | 1,00E+22 | 1,00E+03 | 1,00E+10 |
| 11 | 1,00E+09 | 1,00E+12 | 1,00E+13 | 1,00E+04 | 24 | 1,00E+05 | 1,00E+22 | 1,00E+03 | 1,00E+04 |
| 12 | 1,00E+07 | 1,00E+17 | 1,00E+08 | 1,00E+07 | 25 | 1,00E+09 | 1,00E+12 | 1,00E+13 | 1,00E+10 |
| 13 | 1,00E+03 | 1,00E+17 | 1,00E+08 | 1,00E+07 | 26 | 1,00E+09 | 1,00E+22 | 1,00E+13 | 1,00E+04 |

Fonte: Autora, 2023.

A partir da avaliação quantitativa dos resultados do Planejamento Composto Central foi possível gerar modelos matemáticos para estimar os valores do diâmetro simulado (alcance radial) e profundidade simulada (alcance axial). Para diâmetro simulado e profundidade simulada foram nomeados com D_{sim} e P_{sim} respectivamente, os quais foram utilizados para identificar os valores de D_{xz} , D_y , F_{xz} e F_y na etapa de validação. Após, a etapa do planejamento foi feita uma análise de variância (ANOVA) com o *software* Statistica dos dados obtidos para verificação dos parâmetros que influenciam no modelo de forma significativa, com níveis de significância maiores que 5% . A partir dos modelos gerados os parâmetros (D_{xz} , D_y , F_{xz} , F_y) foram estimados de acordo os resultados experimentais esperados, para isto foi utilizado a ferramenta Solver no *software* Excel utilizando o método GRG não linear fornecido pelo próprio *software*, que teve com função objetivo o produto do erro do diâmetro(D_{erro}) e erro da profundidade (P_{erro}). Para D_{erro} o cálculo foi feito por meio da diferença entre o diâmetro calculado (D_{calc}) e o experimental (D_{exp}), para o P_{erro} o mesmo foi feito, porém com os valores de profundidade calculada (P_{calc}) e profundidade experimental (P_{exp}). Os valores de diâmetro e profundidade calculados foram encontrados a partir da resolução das equações do PCC obtidos no *software* Statistica.

iii. Análise de sensibilidade

No intuito de conhecer melhor os parâmetros que influenciam diretamente no estudo, a partir da Tabela 8, descrita no item “ii”, foi realizada uma análise de sensibilidade de cada um dos parâmetros estudados, com o intuito de identificar sua influência de forma isolada nas respostas avaliadas. As análises de sensibilidade foram realizadas mantendo três parâmetros fixos em seus valores médios e um que variou de acordo com intervalo demonstrado na Tabela 9. Os valores foram escalados em forma logarítmica no intuito de facilitar a visualização e comparação dos resultados obtidos.

Tabela 9- Pontos mínimos, máximos e médio de cada parâmetro a partir do PCC.

| Parâmetros | Mínimo | Máximo | Médio |
|------------|--------|--------|-------|
| D_{xz} | 4 | 10 | 7 |
| D_y | 12 | 18 | 15 |
| F_{xz} | 12 | 18 | 15 |
| F_y | 6 | 12 | 9 |

Fonte: Autora, 2023.

Na Tabela 10, pode ser observado com detalhes os valores adotados na análise de sensibilidade (AS).

Tabela 10- Valores dos Log₁₀ para as análises de sensibilidades

| | CASO | Log₁₀ D_{xz} | Log₁₀ D_y | Log₁₀ F_{xz} | Log₁₀ F_y |
|-------|-------------|--|---------------------------------------|--|---------------------------------------|
| 1ª AS | 1 | 4 | 15 | 15 | 9 |
| | 2 | 5 | 15 | 15 | 9 |
| | 3 | 6 | 15 | 15 | 9 |
| | 4 | 7 | 15 | 15 | 9 |
| | 5 | 8 | 15 | 15 | 9 |
| | 6 | 9 | 15 | 15 | 9 |
| | 7 | 10 | 15 | 15 | 9 |
| 2ª AS | 1 | 7 | 12 | 15 | 9 |
| | 2 | 7 | 13 | 15 | 9 |
| | 3 | 7 | 14 | 15 | 9 |
| | 4 | 7 | 15 | 15 | 9 |
| | 5 | 7 | 16 | 15 | 9 |
| | 6 | 7 | 17 | 15 | 9 |
| | 7 | 7 | 18 | 15 | 9 |
| 3ª AS | 1 | 7 | 15 | 12 | 9 |
| | 2 | 7 | 15 | 13 | 9 |
| | 3 | 7 | 15 | 14 | 9 |
| | 4 | 7 | 15 | 15 | 9 |
| | 5 | 7 | 15 | 16 | 9 |
| | 6 | 7 | 15 | 17 | 9 |
| | 7 | 7 | 15 | 18 | 9 |
| 4ª AS | 1 | 7 | 15 | 15 | 6 |
| | 2 | 7 | 15 | 15 | 7 |
| | 3 | 7 | 15 | 15 | 8 |
| | 4 | 7 | 15 | 15 | 9 |
| | 5 | 7 | 15 | 15 | 10 |
| | 6 | 7 | 15 | 15 | 11 |
| | 7 | 7 | 15 | 15 | 12 |

Fonte: Autora, 2023.

A partir da Tabela 10, foram realizadas novas simulações com cada valor apresentado, no intuito de avaliar quais estariam de acordo com o caso estudado. Além de gerar gráficos com

suas respectivas equações de regressão.

iv. Determinação dos parâmetros D_y e F_{xz} a partir dos dados experimentais

Os valores dos parâmetros D_y e F_{xz} , foram estimados através das equações de regressão obtidas a partir dos dados apresentados nas análises de sensibilidade. Por meio do *software* Statistica, foram gerados os gráficos exponenciais através dos dados vistos na 2ª e 3ª análises da Tabela 10. O modelo utilizado foi na equação foi do tipo “ $y = a \cdot \exp(b \cdot x)$ ”.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos com base na metodologia apresentada.

5.1 Análise das simulações utilizando os parâmetros D_{xz} e D_y

Com base na metodologia abordada no tópico 4.2 item “ii” foi realizada a avaliação exploratória apenas com valores para D_{xz} e D_y , para o conhecimento do comportamento do óleo a partir dessa entrada de valores na simulação.

Com os dados fornecidos na Tabela 6 as simulações foram geradas e tiveram como resultados valores para diâmetro simulado (D_{sim}) e profundidade simulada (P_{sim}), o objetivo é atingir os valores experimentais encontrados por (Doria, 2022) de acordo com a Tabela 2 item 4.1. A Tabela 11 traz os valores obtidos na simulação.

Tabela 11- Planejamento com dados das respostas de D_{sim} (cm) e P_{sim} (cm) de acordo com cada simulação gerada para os valores de D_{xz} e D_y .

| Nº Simulaçã | D_{sim} (cm) | P_{sim} (cm) | Nº Simulação | D_{sim} (cm) | P_{sim} (cm) |
|-------------|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|
| 1 | 0,958 | 3,36 | 14 | 1,07 | 10 |
| 2 | 1,2 | 10 | 15 | 12 | 0,415 |
| 3 | 6,42 | 0,511 | 16 | 3,18 | 1,74 |
| 4 | 1,18 | 10 | 17 | 0,94 | 3,87 |
| 5 | 1,34 | 10 | 18 | 12,3 | 0,38 |
| 6 | 2,22 | 4,32 | 19 | 12,3 | 0,214 |
| 7 | 1,28 | 0,941 | 20 | 1,05 | 10 |
| 8 | 1,2 | 10 | 21 | 4,21 | 0,958 |
| 9 | 1,17 | 10 | 22 | 1,06 | 10 |
| 10 | 1,05 | 10 | 23 | 12,2 | 0,316 |
| 11 | 12 | 0,429 | 24 | 4,18 | 0,983 |
| 12 | 4,54 | 1,05 | 25 | 1,05 | 10 |
| 13 | 12 | 0,459 | | | |

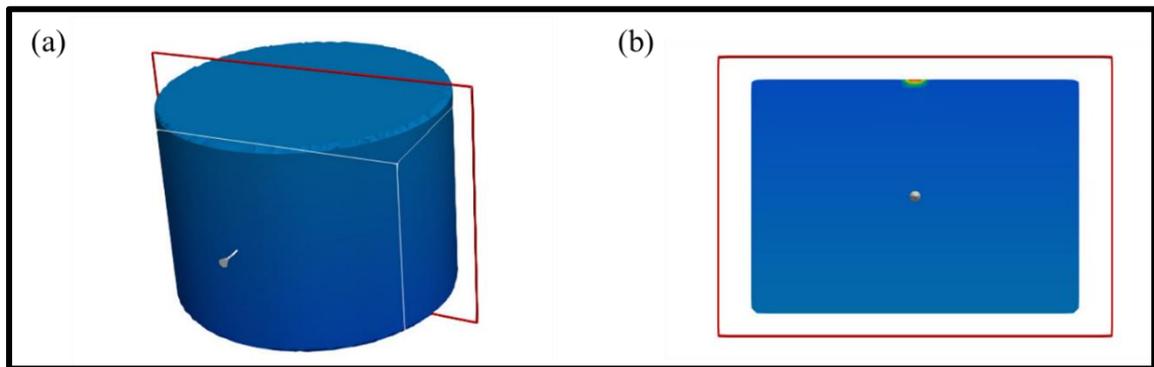
Fonte: Autora, 2023.

A partir dos dados obtidos experimentalmente reportados na Tabela 2, é possível

observar que mesmo com diferentes características dos óleos e distintos valores de granulometria, o experimento obteve valores de $D_{exp} > 2,72$ e $P_{exp} > 4,29$. Avaliando a Tabela 11 em comparativo com o visto por Doria,2022, considera-se que as simulações de números 3, 12, 16, 18, 19, 20, 21, 23 e 24 apresentam valores próximos para D_{sim} . Já para P_{sim} os resultados mais adequados foram nas simulações de números 4, 5, 8, 9, 10, 14, 20, 22 e 25. O que possibilita observar, que as simulações que apresentam um valor de diâmetro dentro do desejável, não são as mesmas que a profundidade, e o mesmo ocorre de forma contrária. Dessa forma, foi visto a necessidade de uma nova avaliação exploratória, adicionando termo “F” da Equação de Darcy-Forchheimer, no intuito de elevar a acurácia do objetivo do trabalho.

Com o intuito de avaliar de forma qualitativa os resultados avaliados, foi realizado um corte no eixo central da geometria através da utilização da ferramenta *slice* do Paraview (Figura 14).

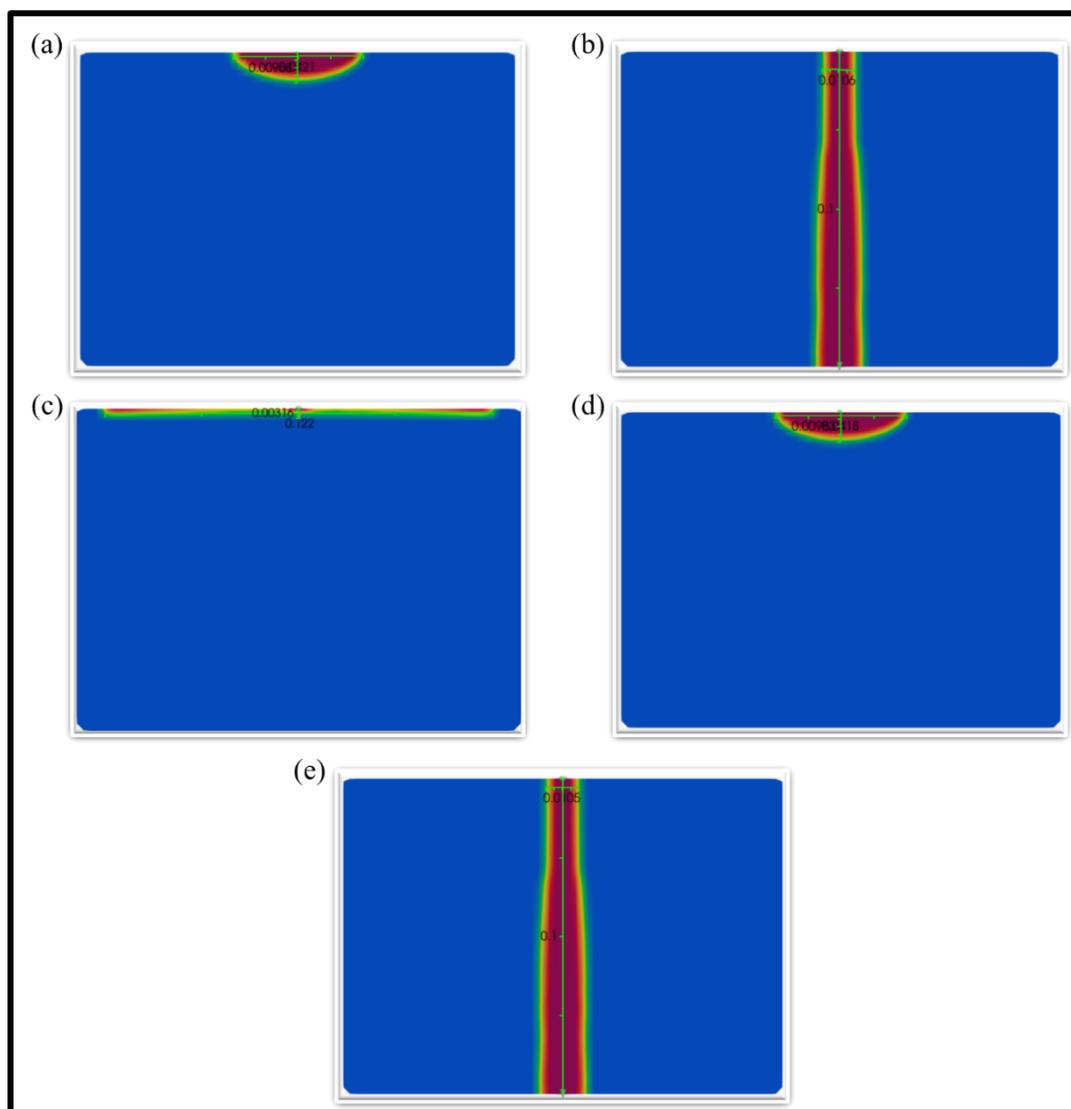
Figura 14- (a) Visão de onde corte será realizado. (b) Corte realizado na geometria.



Fonte: Autora, 2023.

É apresentado na Figura 15 o comportamento realizado pelo fluido nas simulações 21, 22, 23, 24 e 25 com suas respectivas vistas axiais, para uma visibilidade mais favorável do caso estudado.

Figura 15- (a) Comportamento da simulação 21 do óleo de viscosidade $7,72E-05 \mu\text{m}$ no tempo de 300 segundos utilizando D_{xz} e D_y . (b) Comportamento da simulação 22 (c) Comportamento da simulação 23. (d) Comportamento da simulação 24 (e) Comportamento da simulação 25.



Fonte: Autora, 2023.

5.2 Análise das simulações utilizando os parâmetros D_{xz} , D_y , F_{xz} e F_y

Ainda utilizando as características de óleo de viscosidade $7,72E-05 \text{ m}^2/\text{s}^2$, foi realizada mais uma tomada de simulações dessa vez incluído valores para “F” no intuito de determinar a influência desses parâmetros para o escoamento. Baseando-se na Tabela 8 do item “ii” da metodologia, as novas simulações foram geradas e obtiveram os resultados que podem ser observados na Tabela 12.

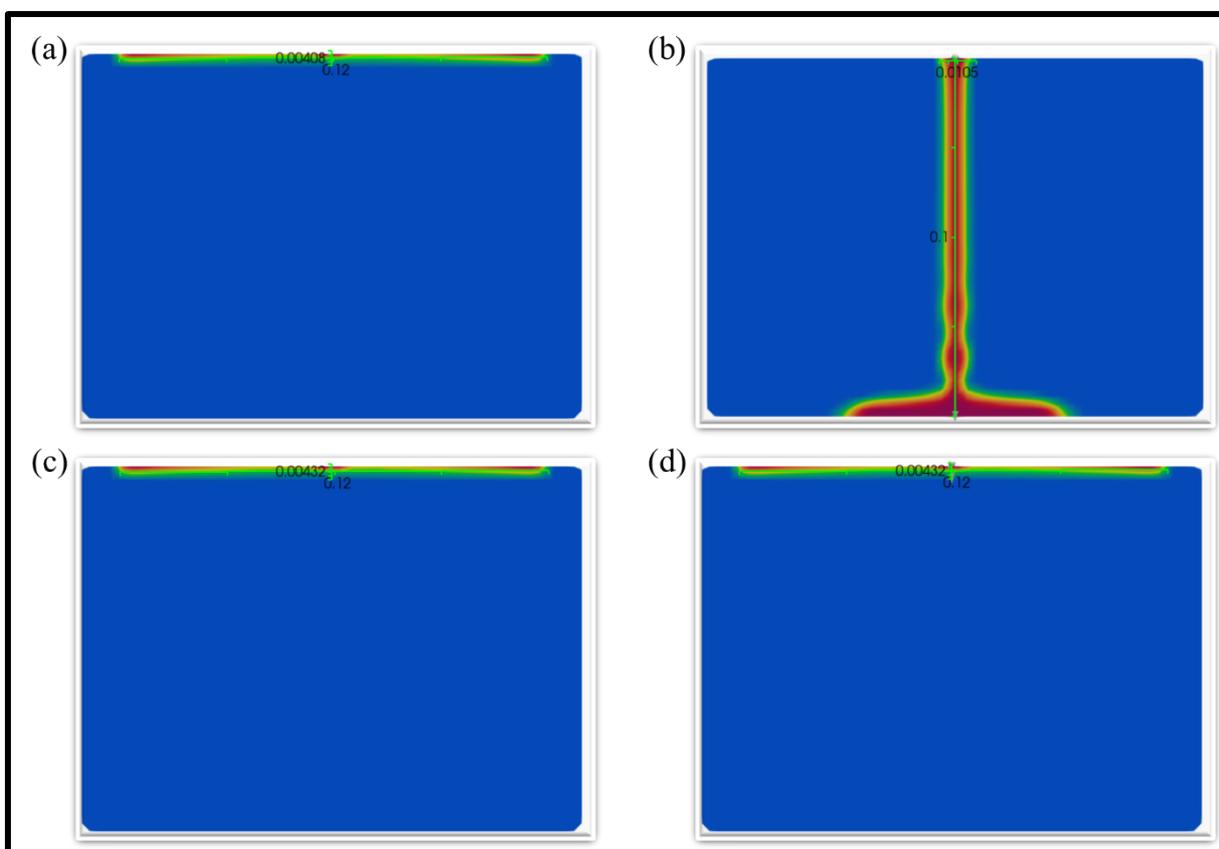
Tabela 12- Planejamento com dados das respostas em diâmetro (cm) e profundidade (cm) de cada simulação gerada para os valores de D_{xz} , D_y , F_{xz} e D_y .

| Nº Simulação | D_{sim} (cm) | P_{sim} (cm) | Nº Simulação | D_{sim} (cm) | P_{sim} (cm) |
|--------------|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|
| 1 | 6,7 | 0,531 | 14 | 5,77 | 0,547 |
| 2 | 2,99 | 3,39 | 15 | 2,81 | 3,42 |
| 3 | 12,2 | 0,468 | 16 | 12 | 0,442 |
| 4 | 12 | 0,359 | 17 | 12 | 0,408 |
| 5 | 6,55 | 0,437 | 18 | 1,05 | 10 |
| 6 | 12,1 | 0,452 | 19 | 12 | 0,432 |
| 7 | 12 | 0,42 | 20 | 12 | 0,432 |
| 8 | 2,86 | 3,37 | 21 | 12 | 0,387 |
| 9 | 5,81 | 0,474 | 22 | 12,1 | 0,416 |
| 10 | 12 | 0,456 | 23 | 12 | 0,431 |
| 11 | 2,74 | 3,45 | 24 | 12,1 | 0,429 |
| 12 | 12 | 0,435 | 25 | 3,04 | 3,53 |
| 13 | 12 | 0,379 | 26 | 12,1 | 0,468 |

Fonte: Autora, 2023.

De acordo com o observado na Tabela 12, ainda tendo como objetivo os valores de D_{exp} e P_{exp} , os casos que apresentam ajustes mais próximos do experimental para diâmetro simulado são de todas as simulações com exceção da de número 18, já para a profundidade o que mais se adequa ao caso é de número 18, o que mostra que os parâmetros devem ser trabalhados em forma conjunta para o alcance do objetivo determinado. Esses valores podem ser observados após a inclusão do termo “F”. A Figura 16 traz os comportamentos das simulações enumeradas de 17 a 20.

Figura 16- (a) Comportamento da simulação 17 do óleo de viscosidade $7,72E-05 \mu\text{m}$ no tempo de 300 segundos utilizando D_{xz} , D_y , F_{xz} e F_y . (b) Comportamento da simulação 18. (c) Comportamento da simulação 19. (d) Comportamento da simulação 20.



Fonte: Autora, 2023.

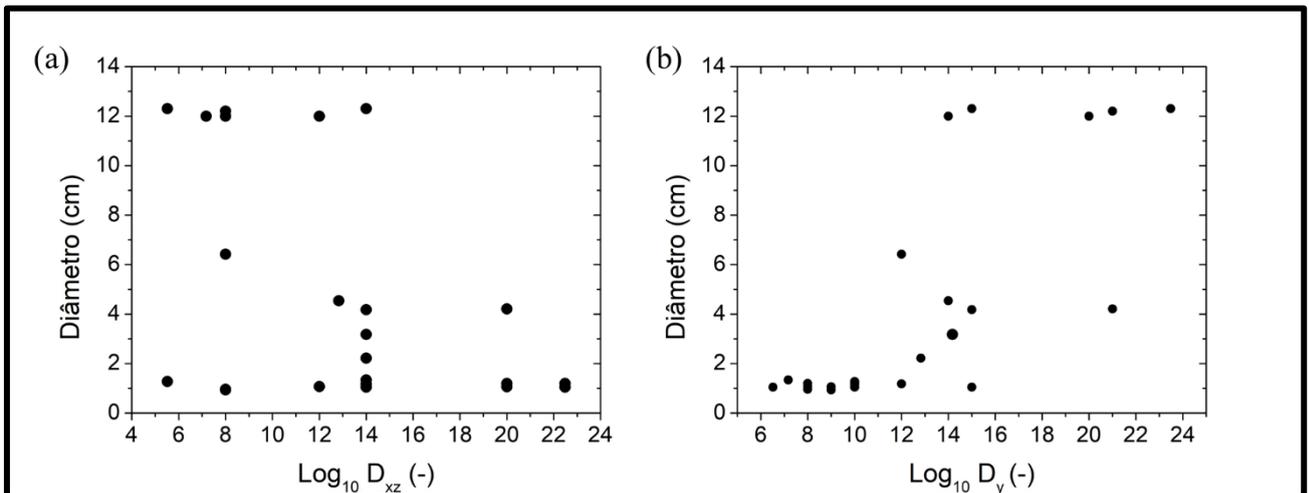
Ao visualizar a Figura 16 é possível observar que o fluido teve um desempenho destoante do avaliado experimentalmente, mesmo atingindo valores para $P_{exp} > 4,29 \text{ cm}$, uma vez que o fluido não está percolando o meio, e sim escoando sem qualquer resistência seja imposta pelo meio poroso, ficando concentrado no fundo, já para os demais casos o óleo não consegue penetrar no meio porosos. Com isso, tendo como constantes a viscosidade e densidade, o meio se torna mais permeável para baixos valores de D , possibilitando que o fluido escoe com mais facilidade sobre estas condições. Dessa forma para baixos valores de D_y em comparativos com os 3 outros parâmetros o valor da permeabilidade (k) assume alto valores fazendo com que o fluido escoe facilmente no eixo y , já para valores de D_y mais alto que D_{xz} o valor de k torna-se menor, possibilitando que o fluido não exerça força o suficiente para os alcances axiais, e se espalhe na superfície de forma radial. A partir dos casos observados acima, é visto que os valores de medidos experimentalmente não foram atingidos, fazendo-se necessário novas

análises, agora adotando possíveis valores D_{xz} , D_y , F_{xz} e F_y . uma vez que seus valores e comportamentos já são conhecidos.

5.3 Análise gráfica de sensibilidade utilizando os parâmetros D_{xz} e D_y

Por meio do *software* Origin Pro (Versão 8.5) foi possível plotar gráficos no intuito de avaliar de forma isolado o desempenho de cada parâmetro $\text{Log}_{10} D_{xz}$ e $\text{Log}_{10} D_y$, com suas respectivas profundidades e diâmetros alcançados pelos óleos percolados. Na Figura 17 (a) é possível observar a performance $\text{Log}_{10} D_{xz}$ em relação ao diâmetro, já na Figura 17 (b) o $\text{Log}_{10} D_y$ em função dos seus diâmetros.

Figura 17- (a) Gráfico D_{xz} (-) x Diâmetro (cm). (b) Gráfico D_y (-) x Diâmetro (cm).



Fonte: Autora, 2023.

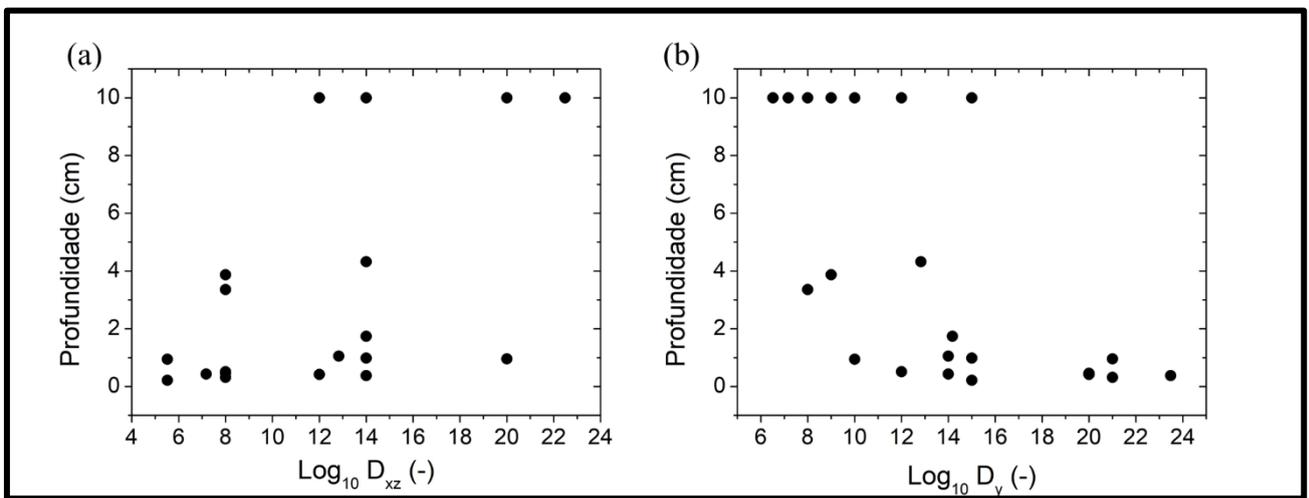
Para a Figura 17(a) a qual mostra gráfico de $\text{Log}_{10} D_{xz}$ em relação ao diâmetro é possível observar que os pontos não seguem um padrão definido, uma vez que para baixos valores de $\text{Log}_{10} D_{xz}$ se tem altos e baixos valores de diâmetro, já para valores de $\text{Log}_{10} D_{xz} \geq 20$ o D_{exp} fica limitado à 5cm. Já para $\text{Log}_{10} D_y$ em função do diâmetro os dados fornecem um comportamento que beneficia a avaliação, uma vez que à medida que os valores de $\text{Log}_{10} D_y$ vão aumentando seu D_{exp} também obtém um comportamento crescente, com exceção de dois pontos que fogem do padrão.

Nas Figuras 18 (a) e (b), é possível avaliar de forma separada os valores atingidos para D_{xz} e D_y em função da profundidade. Para $\text{Log}_{10} D_{xz}$ em função da profundidade observa-se

que quando $\text{Log}_{10} D_{xz}$ apresenta valores de até 11 sua profundidade experimental atinge no máximo 4 cm, para valores de $\text{Log}_{10} D_{xz}$ igual a 14, a profundidade varia de 0 a 10 cm e para valores de $\text{Log}_{10} D_{xz}$ acima de 20, a profundidade varia de 2 a 10 cm.

A Figura 18 (b) mostra o comportamento de $\text{Log}_{10} D_y$ em função da profundidade, é possível observar $\text{Log}_{10} D_y$ variando de 6 a 14 ocorre um desempenho comum, tendo uma profundidade estabelecida em 10 cm, com exceção de alguns valores, que não seguem um padrão. Já quando D_y adotam valores maiores que 16 sua profundidade fica no intervalo de 0 a 2 cm.

Figura 18- (a) Gráfico D_{xz} (-) x Profundidade (cm). (b) Gráfico D_y (-) x Profundidade (cm).



Fonte: Autora, 2023.

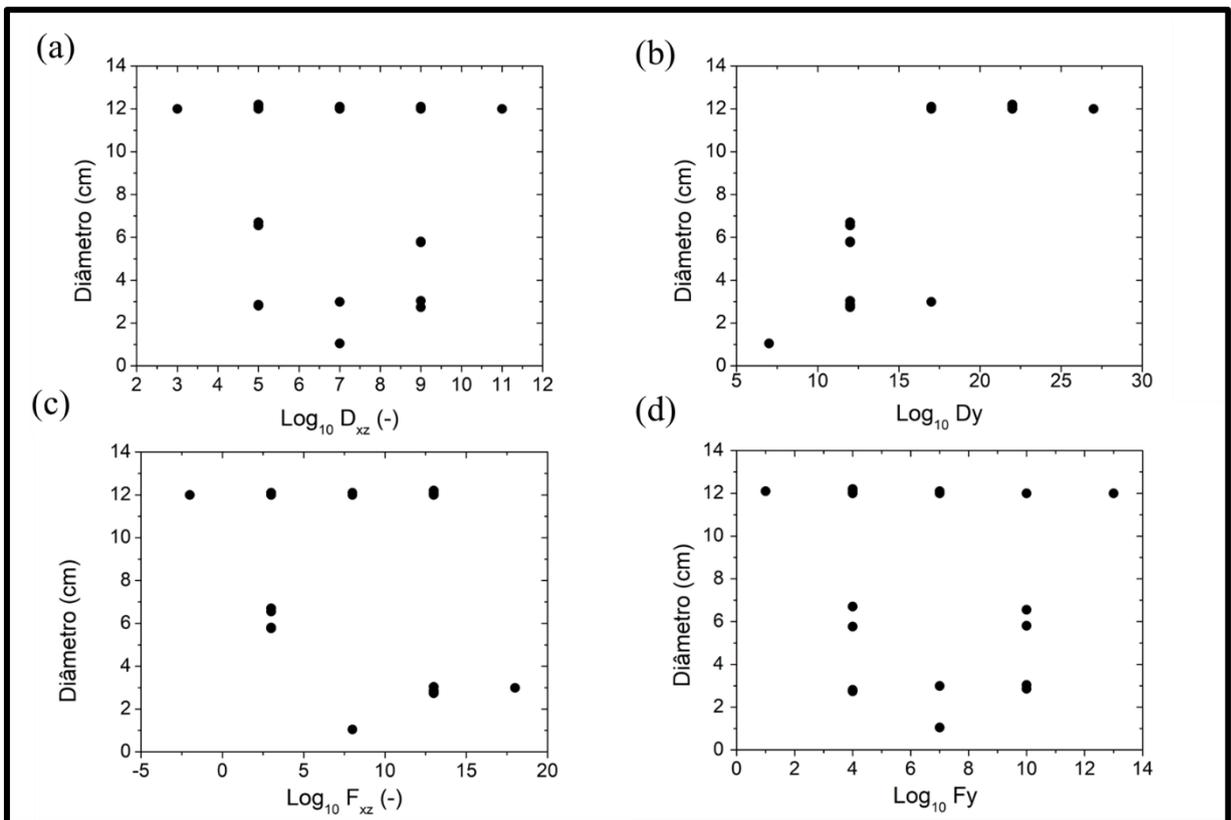
Os gráficos foram gerados no intuito de investigar a influência individual de cada parâmetro sobre a percolação do fluido no meio poroso na simulação. Porém é visto que os pontos não formam um padrão, e com essas variações infrequentes conclui-se que os valores de $\text{Log}_{10} D_{xz}$, D_y , F_{xz} e F_y devem ser avaliados de forma conjunta, uma vez que de forma individual os dados demonstram uma difícil interpretação. É possível observar também que o $\text{Log}_{10} D_y$ apresenta um comportamento de mais fácil interpretação, uma vez que para profundidade e diâmetro ele apresenta valores mais constantes quando comparados ao $\text{Log}_{10} D_{xz}$, o que significa dizer que o $\text{Log}_{10} D_y$ aponta dados mais precisos para a avaliação do caso estudado.

5.4 Análise gráfica de sensibilidade utilizando os parâmetros D_{xz} , D_y , F_{xz} e F_y

Ainda por meio do *software* Origin Pro (Versão 8.5) os gráficos também foram gerados

para a análise de sensibilidade dos parâmetros $\text{Log}_{10} D_{xz}$, D_y , F_{xz} e F_y em relação ao diâmetro e a profundidades de forma individual. A Figura 19 traz os comportamentos individuais de cada parâmetro em função dos seus respectivos diâmetros experimentais, onde é possível avaliar que os valores de $\text{Log}_{10} D_{xz}$ e $\text{Log}_{10} F_y$ apresentam um comportamento semelhante, variando apenas dois pontos. Já para $\text{Log}_{10} D_y$ à medida que seus valores aumentam seu diâmetro também tem valores crescentes, com exceção de dois pontos que varia de 5 a 7 cm, quando $\text{Log}_{10} D_y$ se fixa em aproximadamente 12. Para $\text{Log}_{10} F_{xz}$ (Figura 19.c) variando entre -5 a 14 seu diâmetro permanece estagnado em 10 cm já em relação a valores de $\text{Log}_{10} F_{xz}$ maiores que 10 o diâmetro se encontra em 3cm em dois pontos e em um ponto aproximadamente 3cm.

Figura 19- (a) Gráfico D_{xz} (-) x Diâmetro (cm). (b) Gráfico D_y (-) x Diâmetro (cm). (c) Gráfico F_{xz} (-) x Diâmetro (cm). (d) Gráfico F_y (-) x Diâmetro (cm).

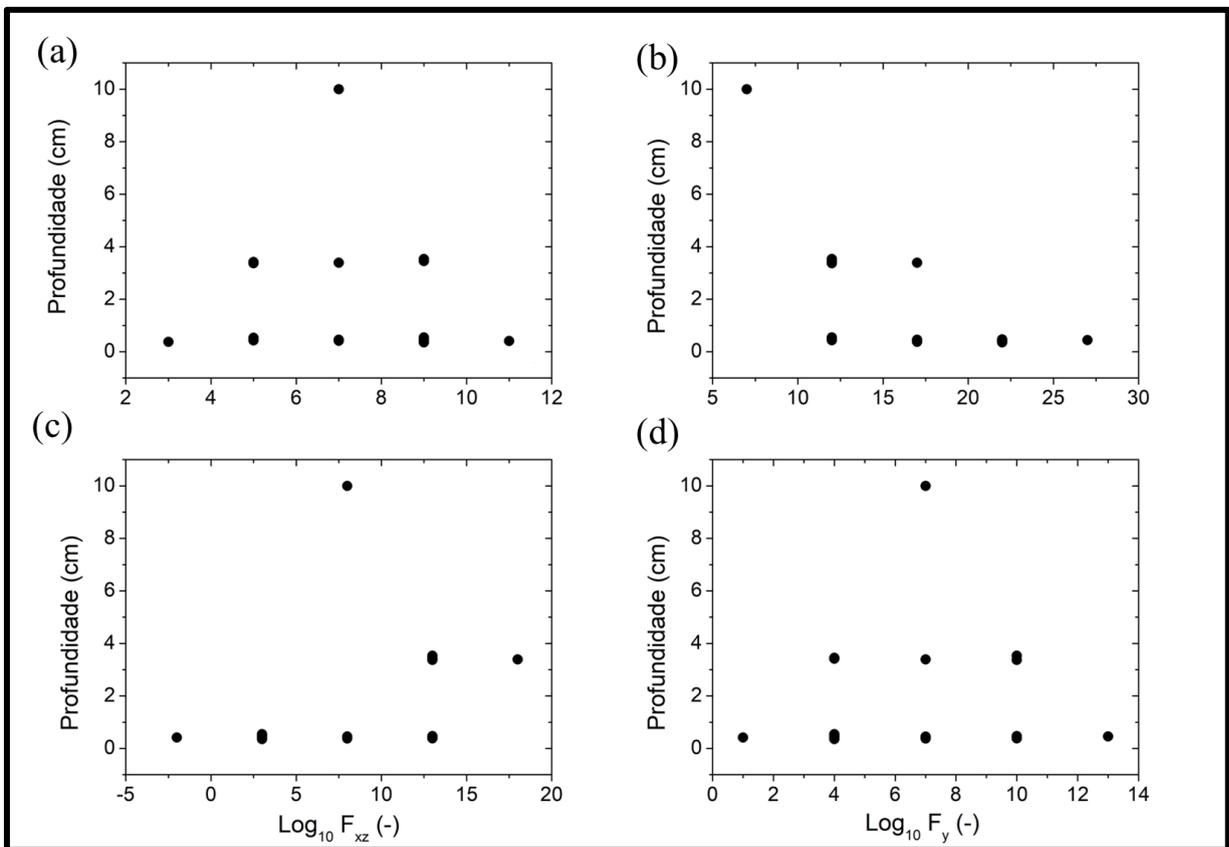


Fonte: Autora, 2023.

A Figura 20 mostra o desempenho dos $\text{Log}_{10} D_{xz}$, D_y , F_{xz} e F_y em função da profundidade, os valores de $\text{Log}_{10} D_{xz}$, e F_{xz} admite as mesmas condutas vistas quando observadas em função dos seus respectivos diâmetros. Porém na Figura (20.b) os valores se

mantêm constantes em aproximadamente 1, mesmo com diferentes valores de $\text{Log}_{10} D_y$, indicando desta maneira que este parâmetro não exerce influência significativa sobre a resposta. Na Figura (20.c) é possível observar que para valores de $\text{Log}_{10} F_{xz}$, entre 10 e 20 a profundidade se comporta da mesma forma que na Figura (20.b), e para os demais valores sua P_{exp} também se mantém em aproximadamente 1, com exceção de um ponto que se encontra em 10 cm, que foi o visto na simulação 18 (Figura 16.b).

Figura 20- (a) Gráfico D_{xz} (-) x Profundidade (cm). (b) Gráfico D_y (-) x Profundidade (cm). (c) Gráfico F_{xz} (-) x Profundidade (cm). (d) Gráfico F_y (-) x Profundidade (cm).



Fonte: Autora, 2023.

É possível notar que após as análises de todos os gráficos, observa-se que de forma independente esses valores não têm influência, pois existe muita aleatoriedade, mas de forma conjunta o desempenho é alcançado em algumas simulações. Os valores fornecidos serviram como base para um melhor direcionamento do estudo e seus possíveis valores que influenciam na simulação.

5.5 ANOVA, modelos e gráficos de superfície

Como descrito no item “ii” tópico 4.2 da metodologia, para a Análise de Variância (ANOVA), foi levado em consideração a relevância das variáveis independentes, utilizando a representação das contribuições lineares (L) e quadráticas (Q) no modelo. Na Tabela 13, é apresentado o resultado da análise de variância da variáveis D_{xz} e D_y avaliando suas influências sobre o diâmetro do escoamento quantificado a partir do *software* Paraview.

Tabela 13- Efeito do planejamento dos parâmetros D_{xz} e D_y de acordo com valores de diâmetro(cm) simulado.

| Fator | Efeito | Erro padrão | t(19) | p | Coefficiente | Erro padrão |
|------------------------|--------|-------------|-------|------|--------------|-------------|
| Média | 4,80 | 0,74 | 6,49 | 0,00 | 4,80 | 0,74 |
| D_{xz} (L) | -8,62 | 1,31 | -6,60 | 0,00 | -4,31 | 0,65 |
| D_{xz} (Q) | 1,58 | 2,02 | 0,79 | 0,44 | 0,79 | 1,01 |
| D_y (L) | 11,17 | 1,29 | 8,69 | 0,00 | 5,58 | 0,64 |
| D_y (Q) | 1,52 | 2,38 | 0,64 | 0,53 | 0,76 | 1,19 |
| D_{xz} por D_y (L) | -9,64 | 2,39 | -4,04 | 0,00 | -4,82 | 1,19 |

Fonte: Autora, 2023.

A Tabela 14 traz os resultados após trato estatístico dos dados, os quais apresentam os efeitos dos fatores significativos do modelo de forma reduzida. Os fatores em que os valores de p resultaram acima de 0,05 não foram considerados como parâmetros que interferem na resposta.

Tabela 14- Valores significativos do efeito do planejamento dos parâmetros D_{xz} e D_y de acordo com diâmetro (cm).

| Fator | Efeito | Erro padrão | t(21) | p | Coefficiente | Erro padrão |
|------------------------|--------|-------------|-------|------|--------------|-------------|
| Média | 5,36 | 0,38 | 14,20 | 0,00 | 5,36 | 0,38 |
| D_{xz} (L) | -8,61 | 1,27 | -6,80 | 0,00 | -4,31 | 0,63 |
| D_y (L) | 11,02 | 1,23 | 8,97 | 0,00 | 5,51 | 0,61 |
| D_{xz} por D_y (L) | -9,68 | 2,32 | -4,18 | 0,00 | -4,84 | 1,16 |

Fonte: Autora, 2023.

Dentre o que foi observados nas Tabelas 13 e 14, é possível notar que os valores D_{xz} e D_y lineares são significativos para obtenção dos diâmetros desejados. O modelo gerou uma

equação, a qual pode ser observada na Equação (16).

$$D_{\text{exp}} = 5,36436 - 4,30553D'_{XZ} + 5,50962D'_Y - 4,83924D'_{XZ}D'_Y \quad (16)$$

Para observar a influência de D_{xz} e D_y em relação a profundidade a mesma análise foi realizada. Na Tabela 15 é possível observar a forma não reduzida, com seus valores significativos e não significativos.

Tabela 15- Efeito do planejamento dos parâmetros D_{xz} e D_y de acordo com valores da profundidade(cm) simulada.

| | Efeito | Erro padrão | t(19) | p | Coefficiente | Erro padrão |
|------------------------|--------|-------------|-------|------|--------------|-------------|
| Fator | | | | | | |
| Média | 3,20 | 0,84 | 3,80 | 0,00 | 3,20 | 0,84 |
| D_{xz} (L) | 7,16 | 1,48 | 4,83 | 0,00 | 3,58 | 0,74 |
| D_{xz} (Q) | -0,45 | 2,29 | -0,20 | 0,85 | -0,22 | 1,14 |
| D_y (L) | -9,71 | 1,46 | -6,65 | 0,00 | -4,85 | 0,73 |
| D_y (Q) | 4,42 | 2,71 | 1,63 | 0,12 | 2,21 | 1,35 |
| D_{xz} por D_y (L) | -4,67 | 2,71 | -1,72 | 0,10 | -2,34 | 1,35 |

Fonte: Autora, 2023.

A Tabela 16 mostra os parâmetros que obtiveram nível de significância maior que 5% para a profundidade, que são eles D_{xz} e D_y .

Tabela 16- Valores significativos do efeito do planejamento dos parâmetros D_{xz} e D_y de acordo com a profundidade (cm).

| | Efeito | Erro padrão | t(22) | p | Coefficiente | Erro padrão |
|--------------|--------|-------------|-------|------|--------------|-------------|
| Fator | | | | | | |
| Média | 4,02 | 0,46 | 8,65 | 0,00 | 4,02 | 0,46 |
| D_{xz} (L) | 8,42 | 1,41 | 5,99 | 0,00 | 4,21 | 0,70 |
| D_y (L) | -9,71 | 1,51 | -6,45 | 0,00 | -4,85 | 0,75 |

Fonte: Autora, 2023.

A Equação (17) foi gerada a partir do modelo fornecido pela ANOVA.

$$P_{\text{exp}} = 4,01522 + 4,211475D'_{XZ} - 4,85318D'_Y \quad (17)$$

As equações criadas a partir do Statistica devem ser normalizadas, no intuito de substituir os valores encontrados de D'_{XZ} (normalizado) e D'_Y (normalizado) nas equações do modelo. As equações de normalização podem ser observadas a seguir, onde a Equação (18) se encontra em função de D'_{XZ} e Equação (19) de D'_Y .

$$D'_{XZ} = \frac{D_{xz} - \overline{D_{xz}}}{\Delta D_{xz}} \quad (18)$$

$$D'_Y = \frac{D_y - \overline{D_y}}{\Delta D_y} \quad (19)$$

Os valores obtidos experimentalmente foram substituídos no intuito de descobrir os valores de D_{xz} e D_y a serem usados numericamente. O objetivo é que o mesmo diâmetro e profundidade sejam encontrados na simulação.

Após as substituições dos valores experimentais de diâmetro e profundidade em (D_{exp} e P_{exp}) de acordo com a Tabela 2, as resoluções e otimizações foram realizadas de acordo com a características de cada óleo por meio do solver no Excel, onde a Tabela 17 mostra o valor detalhado de cada parâmetros de acordo com as viscosidades dos óleos.

Tabela 17- Otimização dos valores a partir das Equações da ANOVA utilizando D_{xz} e D_y .

| μ (m ² /s ²) | D_{exp} | P_{exp} | D'_{XZ} | D'_Y | D_{cale} | P_{cale} | D_{erro} | P_{erro} | Objetivo |
|---|-----------|-----------|-----------|--------|------------|------------|------------|------------|----------|
| 7,72E-05 | 2,72 | 10,00 | 0,61 | 0,00 | 2,72 | 6,60 | 0,00 | 3,40 | 0,00 |
| 7,72E-05 | 4,14 | 6,66 | 0,63 | 0,00 | 2,66 | 6,66 | 1,48 | 0,00 | 0,00 |
| 7,72E-05 | 3,22 | 5,14 | 0,70 | 0,41 | 3,22 | 4,96 | 0,00 | 0,18 | 0,00 |
| 1,64E-04 | 3,23 | 6,49 | 0,54 | 0,06 | 3,23 | 5,97 | 0,00 | 0,52 | 0,00 |
| 1,64E-04 | 4,39 | 5,53 | 0,43 | 0,26 | 4,39 | 4,57 | 0,00 | 0,96 | 0,00 |
| 5,73E-05 | 2,83 | 6,73 | 0,64 | 0,00 | 2,59 | 6,73 | 0,24 | 0,00 | 0,00 |

Fonte: Autora, 2023.

A Tabela 17 foi a que obteve resultados mais esperados em que todos os valores da função objetivo foram iguais a zero. A função objetivo foi calculada através do produto do D_{erro} e P_{erro} . O intuito é que a função objetivo resulte em zero, pois dessa forma entende-se que os valores simulados serão iguais aos experimentais. Após os valores de D'_{XZ} e D'_Y serem definidos os mesmos foram substituídos nas Equações 15 e 16 para cálculo de D_{xz} e D_y . A Tabela 18 mostra os valores determinados para cada simulação.

Tabela 18- Valores encontrados para D_{xz} e D_y a partir dos dados obtidos na otimização.

| D_{xz} | D_y |
|----------|----------|
| 6,98E+08 | 1,00E+15 |
| 7,67E+08 | 1,00E+15 |
| 1,27E+09 | 1,73E+16 |

Continuação da Tabela 18.

| | |
|----------|----------|
| 4,14E+08 | 1,56E+15 |
| 2,01E+08 | 6,13E+15 |
| 8,59E+08 | 1,00E+15 |

Fonte: Autora, 2023.

Na Tabela 19 podem ser observados os valores de D_{sim} e P_{sim} de acordo com os resultados das simulações e características de cada óleo.

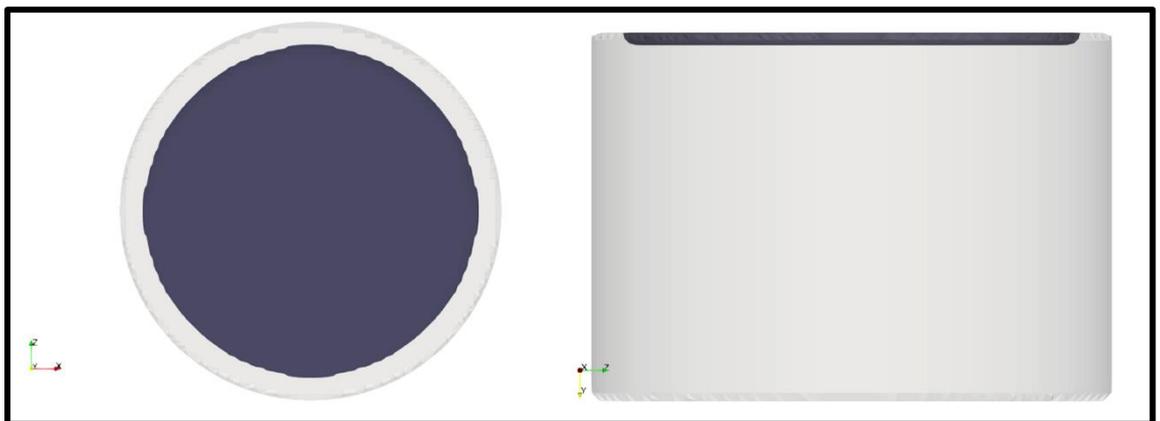
Tabela 19- Valores para D_{sim} e P_{sim} a partir dos valores de D_{xz} e D_y

| μ (m ² /s ²) | D_{sim} (cm) | P_{sim} (cm) |
|---|----------------|----------------|
| 7,72E-05 | 12,4 | 0,178 |
| 7,72E-05 | 12,4 | 0,178 |
| 7,72E-05 | 12,4 | 0,178 |
| 1,64E-04 | 12,4 | 0,178 |
| 1,64E-04 | 12,4 | 0,178 |
| 5,73E-05 | 12,4 | 0,178 |

Fonte: Autora, 2023.

A Figura 21 demonstra a vista superior e frontal do comportamento do óleo com viscosidade 5,73E-05 m²/s².

Figura 21- Vista frontal e superior da percolação do óleo de viscosidade 5,73E-05 m²/s² no tempo de 300 segundos a partir dos valores de D_{xz} e D_y .



Fonte: Autora, 2023.

Mesmo com diferentes valores de viscosidade e massa específica, o comportamento dos óleos no meio poroso foi o mesmo nos três casos avaliados, demonstrando que o modelo implementado no software não leva em consideração tais parâmetros físicos. Desta forma, para suprimir tal limitação foi incorporado ao modelo de estudo o parâmetro “f” da equação de

Darcy-Forchheimer, levando a tabela Anova com adição dos parâmetros F_{xz} e F_y .

A Tabela 20 mostra a análise de variância dos parâmetros de acordo com os diâmetros determinados numericamente após a adição do termo “F”.

Tabela 20- Efeito do planejamento dos parâmetros D_{xz} , D_y , F_{xz} e F_y de acordo com valores de diâmetro(cm) simulado.

| Fator | Efeito | Erro padrão | t(11) | p | Coefficiente | Erro padrão |
|-----------------------|---------------|--------------------|--------------|----------|---------------------|--------------------|
| Média | 12,05 | 1,06 | 11,36 | 0,00 | 12,05 | 1,06 |
| D_{xz} (L) | -0,15 | 0,61 | -0,24 | 0,82 | -0,07 | 0,31 |
| D_{xz} (Q) | -0,43 | 0,72 | -0,60 | 0,56 | -0,22 | 0,36 |
| D_y (L) | 6,84 | 0,61 | 11,16 | 0,00 | 3,42 | 0,31 |
| D_y (Q) | -3,17 | 0,72 | -4,42 | 0,00 | -1,59 | 0,36 |
| F_{xz} (L) | -2,60 | 0,61 | -4,25 | 0,00 | -1,30 | 0,31 |
| F_{xz} (Q) | -2,69 | 0,72 | -3,74 | 0,00 | -1,34 | 0,36 |
| F_y (L) | -0,03 | 0,61 | -0,05 | 0,96 | -0,02 | 0,31 |
| F_y (Q) | -0,41 | 0,72 | -0,57 | 0,58 | -0,20 | 0,36 |
| D_{xz} por D_y | 0,17 | 0,75 | 0,23 | 0,82 | 0,09 | 0,37 |
| D_{xz} por F_{xz} | 0,22 | 0,75 | 0,30 | 0,77 | 0,11 | 0,37 |
| D_{xz} por F_y | 0,08 | 0,75 | 0,11 | 0,92 | 0,04 | 0,37 |
| D_y por F_{xz} | 1,70 | 0,75 | 2,26 | 0,04 | 0,85 | 0,37 |
| D_y por F_y | -0,08 | 0,75 | -0,11 | 0,92 | -0,04 | 0,37 |
| F_{xz} por F_y | 0,03 | 0,75 | 0,04 | 0,97 | 0,02 | 0,37 |

Fonte: Autora, 2023.

É possível visualizar que alguns dados tiveram o valor de $p > 0,05$ onde torna o nível de significância abaixo do desejado, dessa forma a Tabela 21 representa a ANOVA com os valores que obtiveram nível de significância ($p < 0,05$).

Tabela 21- Valores significativos do efeito do planejamento dos parâmetros D_{xz} , D_y , F_{xz} e F_y de acordo com diâmetro (cm).

| Fator | Efeito | Erro padrão | t(20) | p | Coefficiente | Erro padrão |
|------------------------|---------------|--------------------|--------------|----------|---------------------|--------------------|
| Média | 11,42 | 0,41 | 28,16 | 0,00 | 11,42 | 0,41 |
| D_y (L) | 6,84 | 0,47 | 14,60 | 0,00 | 3,42 | 0,23 |
| D_y (Q) | -2,91 | 0,46 | -6,26 | 0,00 | -1,45 | 0,23 |
| F_{xz} (L) | -2,60 | 0,47 | -5,55 | 0,00 | -1,30 | 0,23 |
| F_{xz} (Q) | -2,42 | 0,46 | -5,22 | 0,00 | -1,21 | 0,23 |
| D_y por F_{xz} (L) | 1,70 | 0,57 | 2,96 | 0,01 | 0,85 | 0,29 |

Fonte: Autora, 2023.

A tabela mostra que os parâmetros D_y e F_{xz} tem importância para o cálculo do diâmetro já os demais não possuem uma influência significativa. A análise gerou uma equação a qual pode ser observada na Equação (20).

$$D_{exp}=11,4188+3,4175D'_y-1,4539D'^2_y-1,3000F'_{xz}-1,2114F'^2_{xz}+0,8488D'_y F'_{xz} \quad (20)$$

O mesmo foi feito para análise dos parâmetros em relação a profundidade, onde a Tabela 22 demonstra a ANOVA com seus fatores linear e quadráticos e suas determinadas importância para a simulação.

Tabela 22- Efeito do planejamento dos parâmetros D_{xz} , D_y , F_{xz} e F_y de acordo com valores da profundidade(cm) simulada.

| Fator | Efeito | Erro padrão | t(11) | p | Coefficiente | Erro padrão |
|---------------------------|---------------|--------------------|--------------|----------|---------------------|--------------------|
| Média | 0,44 | 0,89 | 0,50 | 0,63 | 0,44 | 0,89 |
| D_{xz} (L) | 0,02 | 0,51 | 0,03 | 0,98 | 0,01 | 0,26 |
| D_{xz} (Q) | -0,29 | 0,60 | -0,48 | 0,64 | -0,14 | 0,30 |
| D_y (L) | -2,62 | 0,51 | -5,12 | 0,00 | -1,31 | 0,26 |
| D_y (Q) | 2,13 | 0,60 | 3,54 | 0,00 | 1,06 | 0,30 |
| F_{xz} (L) | 1,49 | 0,51 | 2,90 | 0,01 | 0,74 | 0,26 |
| F_{xz} (Q) | 0,47 | 0,60 | 0,78 | 0,45 | 0,23 | 0,30 |
| F_y (L) | -0,01 | 0,51 | -0,02 | 0,99 | 0,00 | 0,26 |
| F_y (Q) | -0,27 | 0,60 | -0,45 | 0,66 | -0,13 | 0,30 |
| D_{xz} por D_y (L) | -0,04 | 0,63 | -0,07 | 0,94 | -0,02 | 0,31 |
| D_{xz} por F_{xz} (L) | 0,02 | 0,63 | 0,03 | 0,97 | 0,01 | 0,31 |
| D_{xz} por F_y (L) | 0,02 | 0,63 | 0,03 | 0,97 | 0,01 | 0,31 |
| D_y por F_{xz} (L) | -1,46 | 0,63 | -2,33 | 0,04 | -0,73 | 0,31 |
| D_y por F_y (L) | 0,01 | 0,63 | 0,02 | 0,99 | 0,01 | 0,31 |
| F_{xz} por F_y (L) | 0,00 | 0,63 | 0,00 | 1,00 | 0,00 | 0,31 |

Fonte: Autora, 2023.

A Tabela 23 traz a forma resumida para profundidade a qual os parâmetros significantes foram o mesmo observado no diâmetro.

Tabela 23- Valores significativos do efeito do planejamento dos parâmetros D_{xz} , D_y , F_{xz} e F_y de acordo com a profundidade (cm).

| Fator | Efeito | Erro padrão | t(21) | p | Coeficiente | Erro padrão |
|------------------------|--------|-------------|-------|------|-------------|-------------|
| Média | 0,39 | 0,26 | 1,49 | 0,15 | 0,39 | 0,26 |
| D_y (L) | -2,62 | 0,40 | -6,54 | 0,00 | -1,31 | 0,20 |
| D_y (Q) | 2,15 | 0,39 | 5,55 | 0,00 | 1,07 | 0,19 |
| F_{xz} (L) | 1,49 | 0,40 | 3,70 | 0,00 | 0,74 | 0,20 |
| D_y por F_{xz} (L) | -1,46 | 0,49 | -2,97 | 0,01 | -0,73 | 0,25 |

Fonte: Autora, 2023.

Os valores que influenciam na simulação segundo a ANOVA foram os de D_y e F_{xz} , dessa forma a Equação (21) foi gerada a partir do modelo apresentado.

$$P_{\text{exp}} = 0,3926 - 1,3112D'_y + 1,0731D'^2_y + 0,7427 F'_{XZ} - 0,7298D'_y F'_{XZ} \quad (21)$$

Para a normalização das Equações (18) e (19) foram usados os valores de D'_y e F'_{XZ} onde D'_y teve o mesmo cálculo da Equação (19), por se tratar do mesmo parâmetro e F'_{XZ} foi normalizado e representado na Equação (22).

$$F'_{XZ} = \frac{F_{xz} - \overline{F_{xz}}}{\Delta F_{xz}} \quad (22)$$

Após as substituições dos valores, e resolução das equações as quais os valores podem ser observados na Tabela 24.

Tabela 24- Otimização dos valores a partir das Equações da ANOVA utilizando D_{xz} , D_y , F_{xz} e F_y .

| μ (m ² /s ²) | D_{exp} | P_{exp} | D'_y | F'_{XZ} | D_{calc} | P_{calc} | D_{erro} | P_{erro} | Objetivo |
|---|------------------|------------------|--------|-----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------|
| 7,72E-05 | 2,72 | 10,00 | 0,00 | 2,20 | 2,72 | 2,02 | 0,00 | 7,98 | 0,00 |
| 7,72E-05 | 4,14 | 6,66 | 0,00 | 1,97 | 4,14 | 1,86 | 0,00 | 4,80 | 0,00 |
| 7,72E-05 | 3,22 | 5,14 | 0,00 | 2,12 | 3,22 | 1,97 | 0,00 | 3,17 | 0,00 |
| 1,64E-04 | 3,23 | 6,49 | 0,00 | 2,12 | 3,23 | 1,97 | 0,00 | 4,52 | 0,00 |
| 1,64E-04 | 4,39 | 5,53 | 0,00 | 1,93 | 4,39 | 1,83 | 0,00 | 3,70 | 0,00 |
| 5,73E-05 | 2,83 | 6,73 | 0,00 | 2,18 | 2,82 | 2,01 | 0,00 | 4,72 | 0,00 |

Fonte: Autora, 2023.

O melhor ajuste para a função objetivo foi o observado acima, onde todos os valores para D_{erro} resultaram em zero e $P_{\text{erro}} > 3$. Por não apresentar resultados satisfatórios para o erro

da profundidade, novas simulações foram realizadas, por meio das substituições dos valores de D'_y e F'_{xz} dadas nas Equações 16 e 17, obtendo novos valores para D_y e F_{xz} , os quais são representados na Tabela 25.

Tabela 25- Valores encontrados para D_{xz} , D_y , F_{xz} e F_y a partir dos dados obtidos na otimização.

| D_y | F_{xz} |
|----------|----------|
| 1,00E+15 | 3,88E+21 |
| 1,00E+15 | 8,28E+20 |
| 1,00E+15 | 2,29E+21 |
| 1,00E+15 | 2,26E+21 |
| 1,00E+15 | 6,22E+20 |
| 1,00E+15 | 3,51E+21 |

Fonte: Autora, 2023.

Após as substituições dos parâmetros encontrados foram geradas 6 novas simulações de acordo com os dados experimentais, onde os resultados para D_{sim} e P_{sim} referente a viscosidade de cada óleo, no tempo de 300 segundos, podem ser observados na Tabela 26.

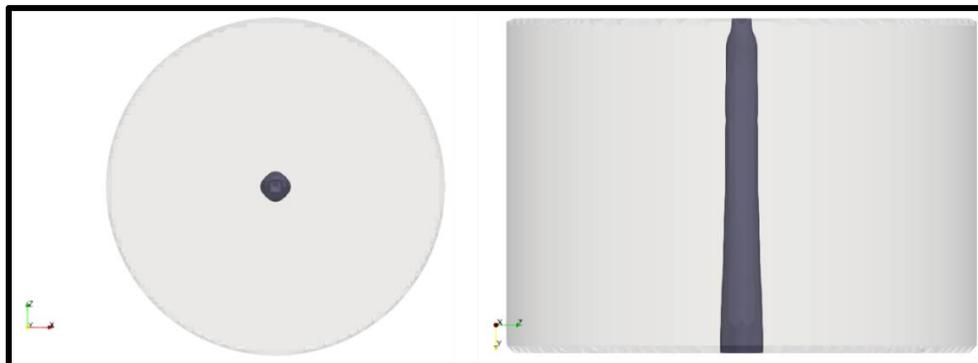
Tabela 26- Valores para D_{sim} e P_{sim} a partir dos valores de D_{xz} , D_y , F_{xz} e F_y .

| μ (m ² /s ²) | D_{sim} (cm) | P_{sim} (cm) |
|---|----------------|----------------|
| 7,72E-05 | 1,19 | 10 |
| 7,72E-05 | 1,19 | 10 |
| 7,72E-05 | 1,19 | 10 |
| 1,64E-04 | 1,19 | 10 |
| 1,64E-04 | 1,19 | 10 |
| 5,73E-05 | 1,19 | 10 |

Fonte: Autora, 2023.

A Figura 22 traz comportamento do óleo com viscosidade 5,73E-05 m²/s², com sua respectiva vista superior e frontal.

Figura 22- Vista frontal e superior da percolação do óleo de viscosidade $5,73E-05 \text{ m}^2/\text{s}^2$ no tempo de 300 segundos a partir dos valores de D_{xz} , D_y , F_{xz} e F_y .



Fonte: Autora, 2023.

É possível observar que as simulações tiveram o mesmo comportamento mesmo com distintos valores para D_y e F_{xz} e diferentes características dos óleos, dessa forma foram realizadas novas tentativas de análise por meio de gráficos e suas respectivas equações de regressão.

5.6 Equações e Gráficos de regressão

De acordo com o item “iii” no tópico 4.2 da metodologia as simulações foram geradas a partir dos valores da Tabela 10, onde obtiveram os resultados trazidos na Tabela 27.

Tabela 27- Valores para D_{exp} e P_{exp} de acordo com as análises de sensibilidades.

| | CASO | $D_{exp}(cm)$ | $P_{exp}(cm)$ |
|-------|------|---------------|---------------|
| 1ª AS | 1 | 3,6 | 1,8 |
| | 2 | 3,6 | 1,8 |
| | 3 | 3,6 | 1,8 |
| | 4 | 3,6 | 1,8 |
| | 5 | 3,6 | 1,8 |
| | 6 | 3,6 | 1,8 |
| | 7 | 3,6 | 1,8 |
| 2ª AS | 1 | 1,6 | 10 |
| | 2 | 2,4 | 8 |
| | 3 | 3,2 | 3,4 |
| | 4 | 4 | 1,61 |
| | 5 | 5,2 | 0,995 |
| | 6 | 7,2 | 0,596 |

Continuação da Tabela 27.

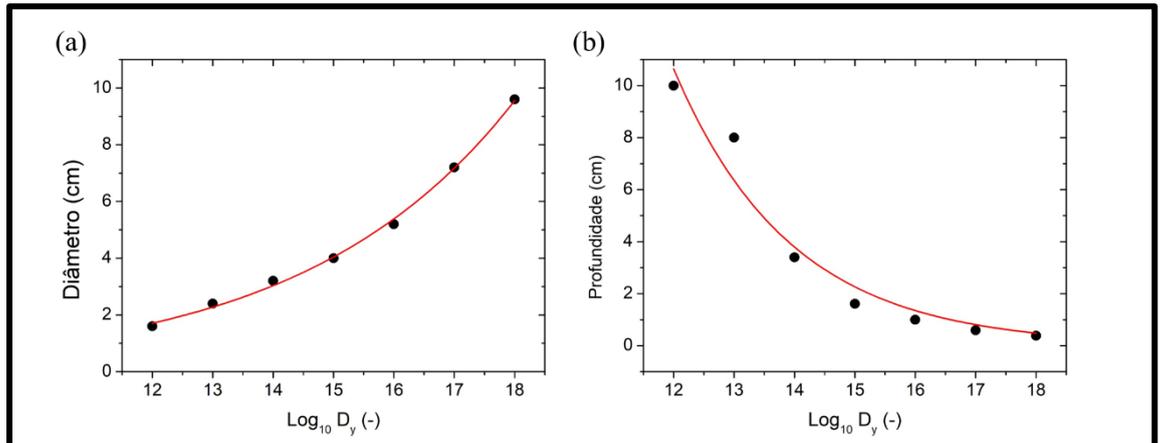
| | | | |
|-------|---|-----|-------|
| | 7 | 9,6 | 0,385 |
| | 1 | 9,6 | 0,383 |
| | 2 | 7,2 | 0,591 |
| | 3 | 5,2 | 0,96 |
| 3ª AS | 4 | 4 | 1,6 |
| | 5 | 3,2 | 3,4 |
| | 6 | 2,4 | 8 |
| | 7 | 1,6 | 10 |
| | 1 | 3,6 | 1,8 |
| | 2 | 3,6 | 1,8 |
| | 3 | 3,6 | 1,8 |
| 4ª AS | 4 | 3,6 | 1,8 |
| | 5 | 3,6 | 1,8 |
| | 6 | 3,6 | 1,8 |
| | 7 | 3,6 | 1,8 |

Fonte: Autora, 2023.

É possível observar que para a 1ª e 4ª análises onde os valores de D_{xz} e F_y foram variados, D_{exp} e P_{exp} se mantiveram constantes, provando os resultados da Anova trazidos na Tabela 23, onde demonstra que apenas D_y e F_{xz} são fatores que influenciam na simulação. Dessa forma os gráficos de regressão foram gerados no *software* Statistica a partir dos dados da 1ª e 2ª análises, utilizando os valores do $\text{Log}_{10} D_y$ e $\text{Log}_{10} F_{xz}$ em função de seus respectivos D_{exp} e P_{exp} obtidos.

Na Figura 23 (a) é possível observar o gráfico de D_y em função do diâmetro e (b) em função da profundidade, é visto que à medida que D_y aumenta os valores de diâmetro também, resultando um comportamento crescente, já para a profundidade o gráfico tem uma ação decrescente, à medida que os valores D_y aumentam sua a profundidade diminui.

Figura 23- (a) Gráfico com exponencial do D_y em função do diâmetro (cm). (b) Gráfico com exponencial do D_y em função da profundidade (cm).



Fonte: Autora, 2023.

Para cada gráfico foram geradas diferentes equações, onde a Equação (23) representa D_y em função do diâmetro e a Equação (24) D_y em função da profundidade.

$$D_{\text{exp}} = 0,05457e^{0,28699D_y} \quad (23)$$

$$P_{\text{exp}} = 5191,41e^{-0,5159D_y} \quad (24)$$

As Equações (23) e (24) foram resolvidas e para o cálculo os valores de diâmetro e profundidade foram substituídos por D_{exp} e P_{exp} trazidos na Tabela 2 do item 4.1. A Tabela 28 traz os valores calculados experimentalmente, e os seus respectivos $\text{Log}_{10} D_y$. Por se tratar de duas equações, dois valores diferentes foram encontrados, um para a profundidade ($\text{Log}_{10} D_y - P$) e outro diâmetro ($\text{Log}_{10} D_y - D$), pelo fato da simulação só permitir o valor de entrada de apenas um número para D_y , a média aritmética ($\text{Log}_{10} \overline{D_y}$) dos seus resultados foi calculada e trazida na Tabela 28.

Tabela 28- Resultados do Log_{10} de D_y para alcance do D_{exp} e P_{exp} e suas respectivas médias aritméticas.

| μ (m ² /s ²) | Diâmetro | | D_{exp} | P_{exp} | $\text{Log}_{10} D_y - D$ | $\text{Log}_{10} D_y - P$ | $\text{Log}_{10} \overline{D_y}$ | D_y |
|---|-----------------------------|--|------------------|------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------------|------------|
| | Partícula (μm) | | | | | | | |
| 7,72E-05 | 5,468 | | 2,72 | 10,00 | 13,62 | 12,12 | 12,87 | 7,4072E+12 |
| 7,72E-05 | 5,0644 | | 4,14 | 6,66 | 15,08 | 12,91 | 14,00 | 9,8955E+13 |
| 7,72E-05 | 3,063 | | 3,22 | 5,14 | 14,21 | 13,41 | 13,81 | 6,4369E+13 |
| 1,64E-04 | 5,468 | | 3,23 | 6,49 | 14,22 | 12,96 | 13,59 | 3,8731E+13 |
| 1,64E-04 | 5,0644 | | 4,39 | 5,53 | 15,29 | 13,27 | 14,28 | 1,8958E+14 |
| 5,73E-05 | 3,063 | | 2,83 | 6,73 | 13,76 | 12,89 | 13,32 | 2,1015E+13 |

Fonte: Autora, 2023.

Pelo fato dos gráficos representados na Figura 23 terem sido plotados com base nos valores dispostos na Tabela 10 (2ª AS) em que F_{xz} se manteve constante, e os valores de D_y variaram o mesmo foi realizado para a nova análise, e pode ser visto na Tabela 29. A Tabela 29 demonstra o valor do erro médio quadrático em relação ao diâmetro simulado com o experimental (MSE-D) e a profundidade experimental com a simulada (MSE-P)

Tabela 29- Valores de D_{sim} e P_{sim} a partir das resoluções de equações de regressão em função de D_y e seus respectivos erros médios quadráticos.

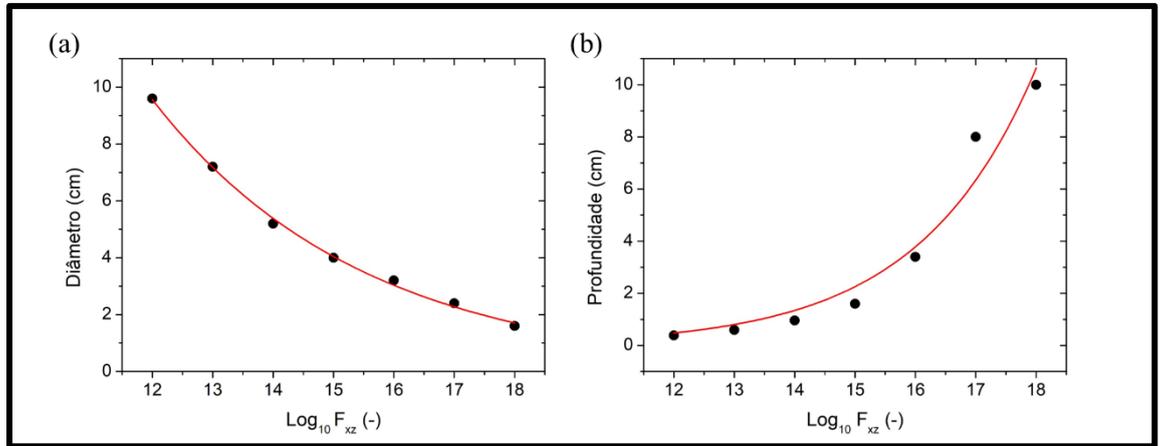
| Nº | Simulação | μ (m ² /s ²) | Log 10 D_y | Log 10 F_{xz} | D_{sim} (cm) | P_{sim} (cm) | MSE- D_{sim} | MSE- P_{sim} |
|----|-----------|---|--------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 1 | 7,72E-05 | 7,41E+12 | 1,00E+15 | 2,4 | 9 | 11,76% | 10,00% |
| 2 | 2 | 7,72E-05 | 9,90E+13 | 1,00E+15 | 3,2 | 3,4 | 22,71% | 48,95% |
| 3 | 3 | 7,72E-05 | 6,44E+13 | 1,00E+15 | 2,8 | 3,8 | 13,04% | 26,07% |
| 4 | 4 | 1,64E-04 | 3,87E+13 | 1,00E+15 | 3,2 | 3,6 | 0,93% | 44,53% |
| 5 | 5 | 1,64E-04 | 1,90E+14 | 1,00E+15 | 3,6 | 2,2 | 18,00% | 60,22% |
| 6 | 6 | 5,73E-05 | 2,10E+13 | 1,00E+15 | 2,4 | 6,6 | 15,19% | 1,93% |

Fonte: Autora, 2023.

É possível avaliar que essa nova análise para D_y teve um excelente desempenho, e os valores foram próximos do experimental, tendo casos que apresentou erro de 0,93%. Porém em alguns casos o $MSE > 40\%$, dessa forma para melhor ajuste o termo “f” também foi avaliado a fim dos valores simulados serem iguais aos experimentais.

A Figura 24 mostra a influência de F_{xz} em relação a diâmetro (24.a) e a profundidade (24.b), onde é possível perceber que à medida que os valores de F_{xz} aumenta o diâmetro diminui, e à medida que F_{xz} aumenta a sua profundidade também cresce, sendo um inverso do outro, e precisando chegar em um ajuste em que o ponto se encontre de forma correta.

Figura 24- (a) Gráfico com exponencial do F_{xz} em função do diâmetro (cm). (b) Gráfico com exponencial do F_{xz} em função da profundidade (cm).



Fonte: Autora, 2023.

A partir dos gráficos foram geradas novas equações de regressão que podem ser observadas na Equação (25) em relação ao diâmetro e Equação (26) em função da profundidade.

$$D_{\text{exp}} = 299,2967e^{-0,28699F_{xz}} \quad (25)$$

$$P_{\text{exp}} = 0,000962148e^{0,51729F_{xz}} \quad (26)$$

As equações foram resolvidas e seus resultados podem ser observados na Tabela 30. É possível visualizar que as equações trazem modelos diferentes, onde os valores para F_{xz} serão distintos para a profundidade ($\text{Log}_{10} F_{xz} - P$) e diâmetro ($\text{Log}_{10} F_{xz} - D$). Dessa forma os valores de entrada na simulação foram baseados em suas respectivas médias aritméticas ($\text{Log}_{10} \overline{F_{xz}}$) de acordo com a característica apresentada em cada óleo. Os valores foram convertidos para sua forma exponencial representados por (F_{xz}) na Tabela 30.

Tabela 30- Resultados do Log_{10} de D_y para alcance do D_{exp} e P_{exp} e suas respectivas médias aritméticas.

| μ (m^2/s^2) | Diâmetro | | D_{exp} | P_{exp} | $\text{Log}_{10} F_{xz} - D$ | $\text{Log}_{10} F_{xz} - P$ | $\text{Log}_{10} \overline{F_{xz}}$ | F_{xz} |
|-----------------------------------|-----------------------------|--|------------------|------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|----------|
| | Partícula (μm) | | | | | | | |
| 7,72E-05 | 5,468 | | 2,72 | 10,00 | 16,38 | 17,88 | 17,13 | 1,35E+17 |
| 7,72E-05 | 5,0644 | | 4,14 | 6,66 | 14,92 | 17,09 | 16,00 | 1,01E+16 |
| 7,72E-05 | 3,063 | | 3,22 | 5,14 | 15,79 | 16,59 | 16,19 | 1,56E+16 |
| 1,64E-04 | 5,468 | | 3,23 | 6,49 | 15,78 | 17,04 | 16,41 | 2,58E+16 |
| 1,64E-04 | 5,0644 | | 4,39 | 5,53 | 14,71 | 16,73 | 15,72 | 5,28E+15 |
| 5,73E-05 | 3,063 | | 2,83 | 6,73 | 16,24 | 17,11 | 16,68 | 4,76E+16 |

Fonte: Autora, 2023.

As substituições dos valores resultaram em novos resultados com novos valores de D_{sim} e

P_{sim} de acordo com a Tabela 31, para a determinação foi utilizado os valores de F_{xz} trazidos na Tabela 30, e D_y manteve seus valores constantes em $1E+15$, com o intuito de verificar a influência de cada termo na simulação.

Tabela 31- Valores de D_{sim} e P_{sim} a partir das resoluções de equações de regressão em função de F_{xz} e seus respectivos erros médios quadráticos.

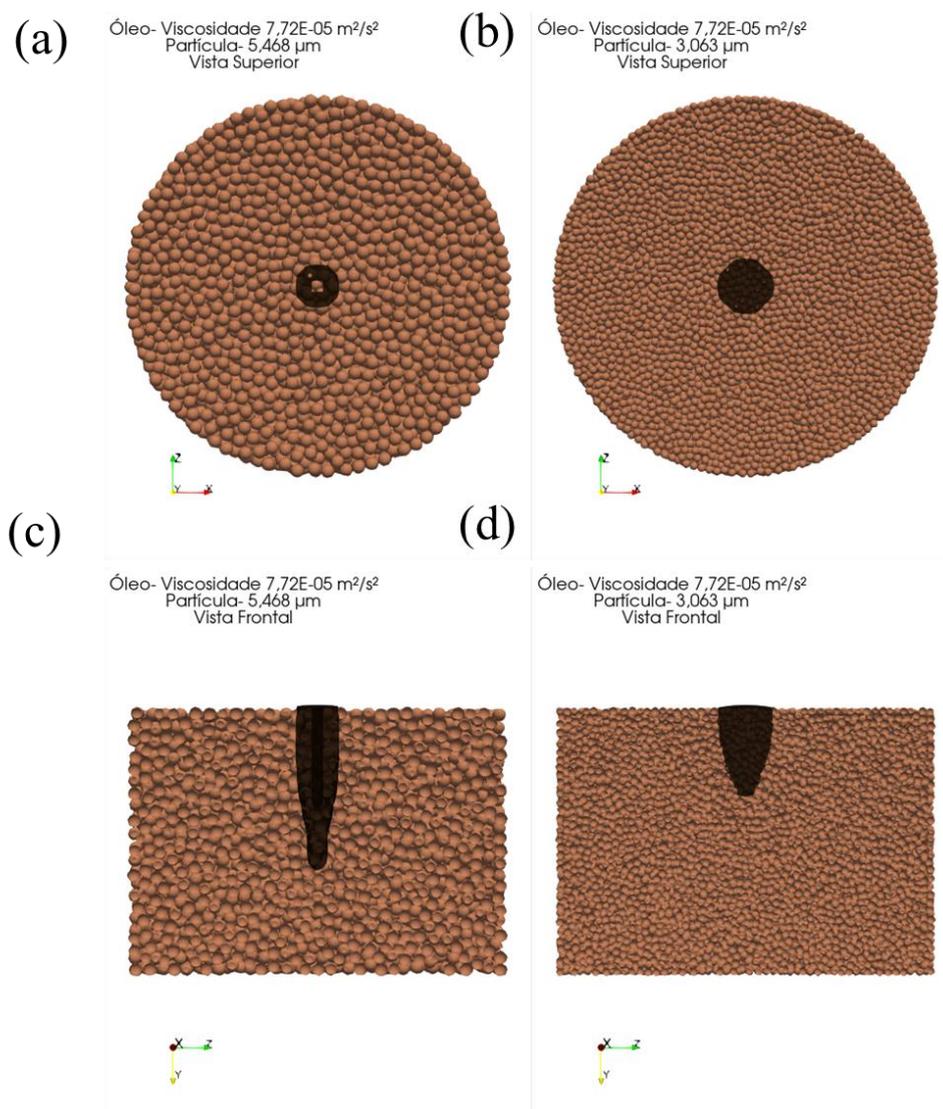
| Nº Simulação | μ (m ² /s ²) | Log 10 D_y | Log 10 F_{xz} | D_{sim} (cm) | P_{sim} (cm) | MSE- D_{sim} | MSE- P_{sim} |
|-----------------|---|--------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 7,72E-05 | 1E+15 | 1,35E+17 | 2,4 | 9 | 11,76% | 10,00% |
| 2 | 7,72E-05 | 1E+15 | 1,01E+16 | 3,2 | 3,4 | 22,71% | 48,95% |
| 3 | 7,72E-05 | 1E+15 | 1,56E+16 | 2,8 | 3,8 | 13,04% | 26,07% |
| 4 | 1,64E-04 | 1E+15 | 2,58E+16 | 3,2 | 3,6 | 0,93% | 44,53% |
| 5 | 1,64E-04 | 1E+15 | 5,28E+15 | 3,6 | 2,2 | 18,00% | 60,22% |
| 6 | 5,73E-05 | 1E+15 | 4,76E+16 | 2,4 | 6,6 | 15,19% | 1,93% |

Fonte: Autora, 2023.

É possível constatar que os valores trazidos na Tabela 31 tem as mesmas respostas para D_{sim} e P_{sim} vistas na Tabela 29, o qual conclui-se que os parâmetros D e F devem ser trabalhados de forma conjunta, e de modo que um de seus parâmetros levem em conta os alcances axiais (D_y) e radiais (F_{xz}). Os resultados demonstram que o modelo de Darcy-Forchheimer, quando aplicado em simulações de escoamento em meios porosos, pode aproximar-se dos dados obtidos experimentalmente, quando levado em consideração a viscosidade do óleo, velocidade de entra do fluido e densidade.

A simulação de nº 01 obteve D_{exp} 2,72 cm e P_{exp} 10 cm já para a simulação os valores de D_{sim} foi de 2,4 cm e P_{sim} de 9 cm em uma granulometria de areia de 5,468 μ m. A Figura 25 traz as vistas superiores e frontais das simulações em comparativo com a simulação e nº 06 a qual apresentou um tamanho menor de partícula (3,063 μ m) e D_{sim} de 2,8 cm e P_{sim} 3,8 cm. As Figuras (25.a) e (25.b) traz a vista superior e frontal das partículas de 5,468 μ m e as Figuras (25.b) e (25.d) a partícula de 3,063 μ m com suas respectivas vistas.

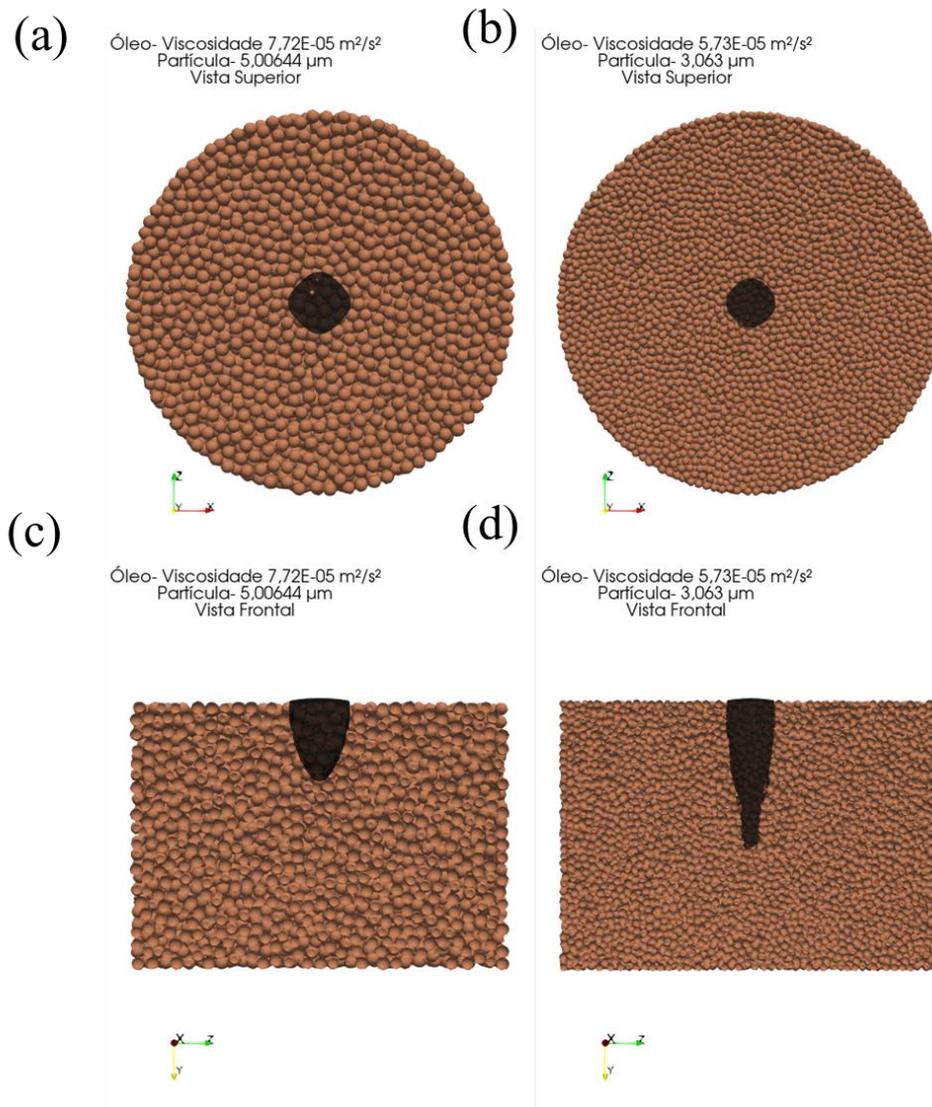
Figura 25- Percolação do óleo de viscosidade $7,72E-05 \text{ m}^2/\text{s}^2$ na granulometria de $5,468 \mu\text{m}$ (a) e (c) e $3,063 \mu\text{m}$ (b) e (d).



Fonte: Autora, 2023.

A Figura 26 comprova o desempenho do fluido com diferentes viscosidade e granulometria. As Figuras 26 (a) e (c) aponta o desempenho da simulação de nº 02 a qual obteve um D_{sim} de 3,2 cm e P_{sim} de 3,4 cm e comparativo com seus valores experimentais de D_{exp} 4,14 cm e P_{sim} 6,66. Já as Figuras 26 (b) e (d) a percolação do óleo da simulação de nº 06 ocorreu nas partículas de $3,063 \mu\text{m}$ e viscosidade de $5,73E-05 \text{ m}^2/\text{s}^2$ onde atingiu 2,4 cm para D_{sim} e 6,66 cm P_{sim} que em comparação com o experimental obteve D_{exp} de 2,83 cm e P_{exp} 6,73cm.

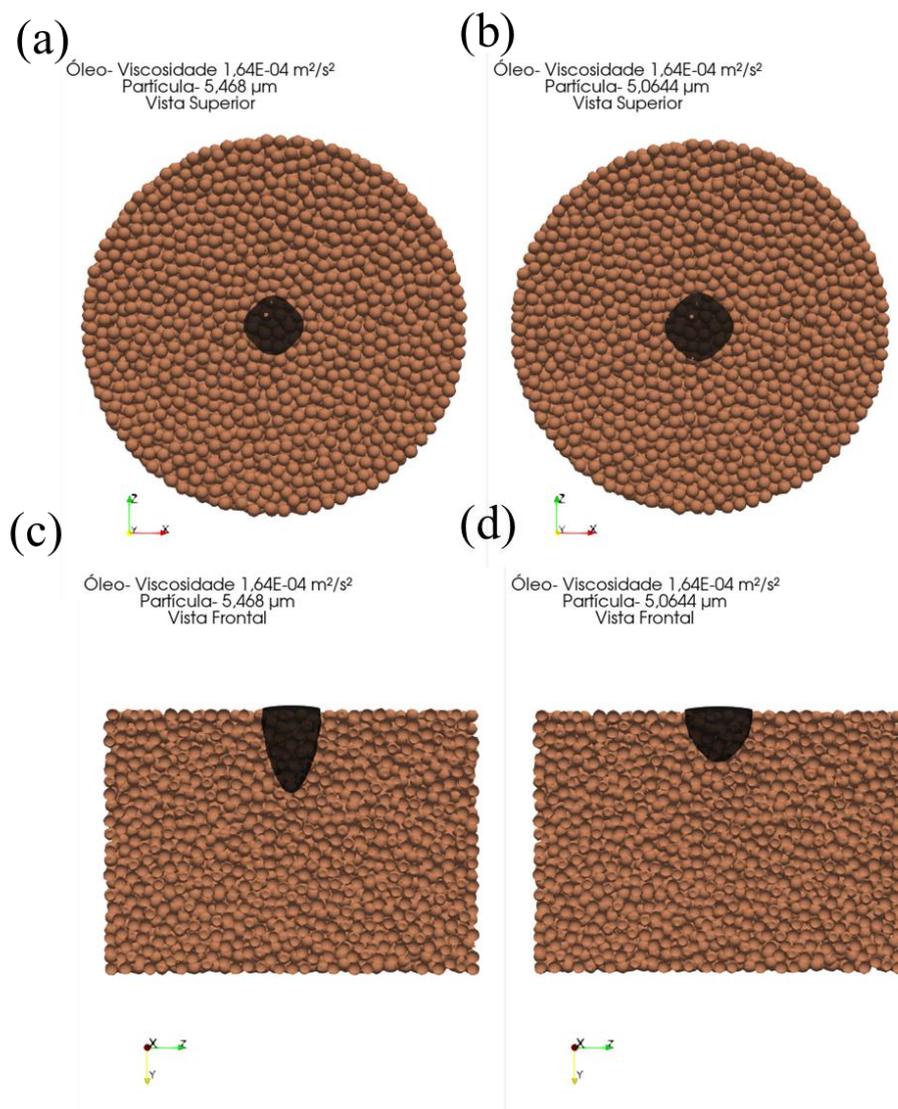
Figura 26- Percolação do óleo de viscosidade $7,72E-05 \text{ m}^2/\text{s}^2$ na granulometria de $5,0644 \mu\text{m}$ (a) e (c) e $3,063 \mu\text{m}$ de granulometria e viscosidade de óleo $5,73E-05 \text{ m}^2/\text{s}^2$ (b) e (d).



Fonte: Autora, 2023.

A Figura 27 demonstra as relações das simulações de nº 04 e nº 05 as quais tiveram valores próximos de granulometria, $5,468 \mu\text{m}$ para a de nº 04 e $5,0644 \mu\text{m}$ para a de nº 05. A Figura (27.a) e (27.c) mostra as vistas superiores e frontais respectivamente em uma viscosidade de $1,64E-04 \text{ m}^2/\text{s}^2$ e para Figura 27(b) e (d) a mesma viscosidade com a diferença de granulometria. Para o diâmetro a simulação nº 04 teve uma diferença de entre o experimental e o simulado de $0,03 \text{ cm}$ e profundidade $2,89 \text{ cm}$. Já para a nº 05 a desigualdade do experimental para a simulação foi de $0,79 \text{ cm}$ para diâmetro e $3,33 \text{ cm}$ para profundidade.

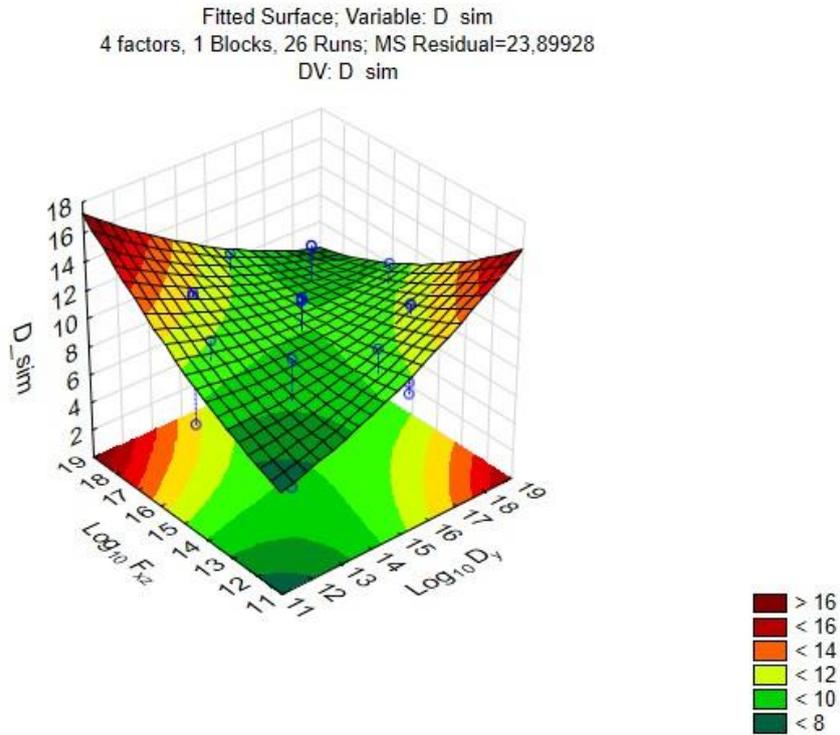
Figura 27- Percolação do óleo de viscosidade $1,64E-04 \text{ m}^2/\text{s}^2$ na granulometria de $5,468 \mu\text{m}$ (a) e (c) e $5,0644 \mu\text{m}$ (b) e (d).



Fonte: Autora, 2023.

Os modelos de superfície de resposta realizados através do *software* Statistica confirmam a influência de D_y e F_{xz} para as respostas das simulações obtidas, como pode ser visto nas Figuras 28 e 29.

Figura 28- Superfície de resposta do D_{sim} avaliando $\text{Log}_{10} D_y$ e $\text{Log}_{10} F_{xz}$.

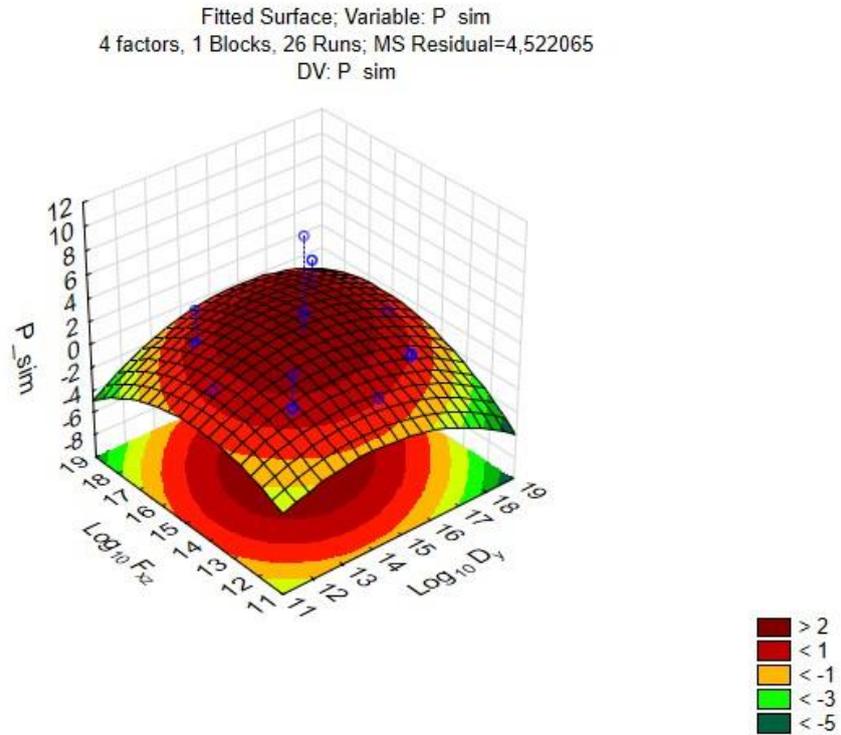


Fonte: Autora, 2023.

De acordo com a Figura 28 os dois parâmetros influenciam nos valores de D_{sim} à medida que os valores do $\text{Log}_{10} F_{xz}$ ultrapassam de 15, a maior a influência associadas ao D_{sim} . O mesmo ocorre para $\text{Log}_{10} D_y$, onde maiores valores de D_y maior também a influência do diâmetro. Já em valores <12 se concentram as menores regiões de influenciaram em relação a variável de interesse.

Na Figura 29 é possível observar a relação do $\text{Log}_{10} D_y$ e $\text{Log}_{10} F_{xz}$ em relação a profundidade, onde os valores <-1 para D_y e F_{xz} maior influência do P_{sim} e para valores <-3 P_{sim} não interfere na superfície de resposta.

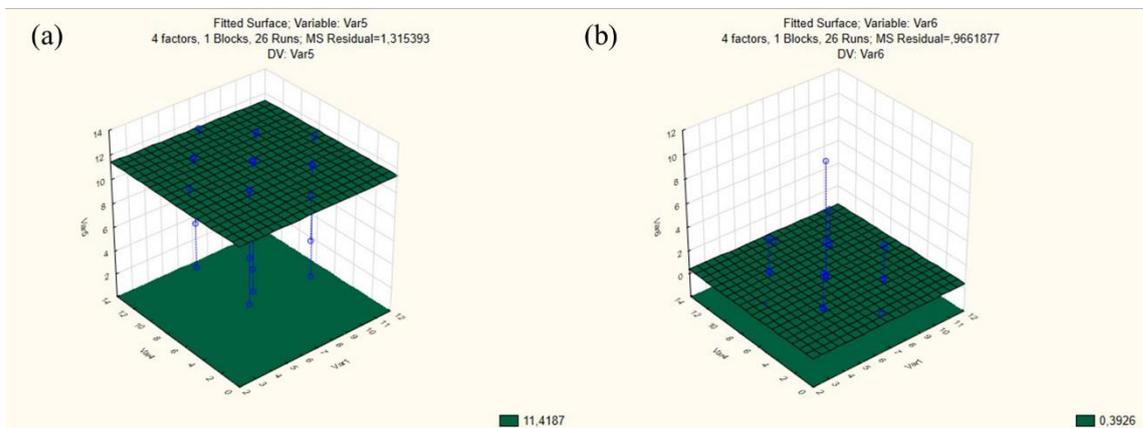
Figura 29- Superfície de resposta da P_{sim} avaliando $\text{Log}_{10} D_y$ e $\text{Log}_{10} F_{xz}$.



Fonte: Autora, 2023.

A Figura 30 mostra as variáveis que não influenciam de forma alguma no estudo, para melhor visualização e comprovação dos resultados obtidos.

Figura 30- (a) Superfície de resposta de D_{sim} avaliando $\text{Log}_{10} D_{xz}$ e $\text{Log}_{10} F_y$. (b) Superfície de resposta de P_{sim} avaliando $\text{Log}_{10} D_{xz}$ e $\text{Log}_{10} F_y$.



Fonte: Autora, 2023.

A Figura 30 mostra a relação dos parâmetros de $\text{Log}_{10} D_{xz}$ e $\text{Log}_{10} F_y$ em relação ao diâmetro Figura (30.a) e profundidade Figura (30.b). Pois mesmo objetivando valores máximos da região de interesse as variáveis não influenciam na superfície de resposta Figura (30.a), e o mesmo ocorre quando se é avaliado os menores valores para a variável de interesse (P_{sim}) visto que não ocorre mudança significativas na superfície de resposta.

6 CONCLUSÕES

A simulação numérica é de grande valia quando se trata de prevenção e estudos de casos relacionando ao meio ambiente, visto que dessa forma, com os valores e parâmetros calibrados de forma correta, os estudos seriam mais eficientes e os derramamentos de óleo causariam menos prejuízos a natureza em áreas em que ocorreram tais desastres ambientais. Os modelos matemáticos são ferramentas capazes de prever os caminhos por onde o óleo pode ir, a fim de orientar uma resposta assertiva. Foi possível observar que os parâmetros da equação de Darcy-Forchheimer estão relacionados diretamente com a percolação do óleo em meios arenosos, porém de acordo com o que foi visto nos resultados e apontamentos dos gráficos, esses valores não possuem influência quando são relacionados de forma individual, já de forma conjunta são capazes de realizar mudanças notórias e significativas em seu escoamento. É visto também que apesar da literatura apontar que o termo de Forchheimer só deverá ser aplicado para fluxos turbulentos, o modelo se adequa para o caso estudado mesmo possuindo um fluxo do tipo laminar. Com isso, a parametrização e aplicação do modelo de Darcy-Forchheimer no escoamento de óleo em meios porosos, demonstram que a partir das equações de regressão utilizando os parâmetros D e F os resultados apresentam uma boa concordância quando comparados os resultados da simulação através do OpenFOAM com o experimental. Assim, é possível concluir que estudo poderá ser utilizado em futuros casos de derramamento, desde que os dados sejam devidamente calibrados e utilizados de acordo com a característica de cada óleo e granulometria das partículas em que houve o derramamento.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED, T. **Reservoir Engineering Handbook**. Gulf Professional Publishing, 1376 pp, 2006.

ARAÚJO, J. W. C. de. **Simulação de leito fluidizado via CFD com abordagem Euleriana de escoamento bifásico mediante influência de parâmetros de projeto e operação**. 2020. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

ANTONIACOMI e SOUZA, A **Técnica Dos Múltiplos Domínios Aplicada À Geração De Malhas No Software Ansys Cfx-Mesh**. Conen 2010, Campina Grande, Paraíba.

BARKER, C. H. et al. **Progress in operational modeling in support of oil spill response**. Journal of Marine Science and Engineering, MDPI AG, 2020.

BEZERRA, A. R. A. **Utilização da fluidodinâmica computacional como ferramenta de estudo em bombas centrífugas**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

BOSCOV, M. E. G. (1997). **Contribuição ao Projeto de Sistemas de Contenção de Resíduos Perigosos Utilizando Solos Lateríticos**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 269p.

CARMAN, P.C. Fluid flow through granular beds. **Transactions of the Institution of Chemical Engineers**, v. 15, p. 150-166, 1937.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Sólidos e Suas Aplicações**. 5.ed. Rio de Janeiro: L.T.C., 1987. 242p.

CHIESA, M.; MATHIESEN, V.; MELHEIM, J. A.; HALVORSEN, B. **Numerical simulation of particulate flow by the Eulerian-Lagrangian and the Eulerian-Eulerian approach with application to a fluidized bed**. Computers & Chemical Engineering, v. 29, n. 2, p. 291-304, 2005.

CHIESA, M.; MATHIESEN, V.; MELHEIM, J. A.; VERSTEERG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics. The finite volume method**. 2nd ed. EUA: Pearson Education Limited, 2007.

DEMUELENAERE, R.G.A. **Caracterização de Propriedades de Transporte de metais Pesados em Solos Residuais do Rio de Janeiro**, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2004.

DUARTE, C. R. **Estudo experimental e de simulação da fluidodinâmica e recobrimento em leito de jorro**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

DARCY, H. **Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon**, Victor Dalmont. Paris, 1856.

DATE, A. **Introduction to Computational Fluid Dynamics** (pp. 1-16). 2005.

DÓRIA, T. G. S. **Análise da percolação de derivados de petróleo em solo arenoso do litoral alagoano**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2022

FERREIRA, A.A. **Simulação de Fluxo no Meio Poroso Utilizando o Fluent**. 2010. 174 f. Dissertação (Mestrado em Pesquisa e Desenvolvimento em Ciência e Engenharia de Petróleo) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

FERZIGER, J. H. & PERIC, M. 2001. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. P. 426. Springer.

FOGAÇA, L.B.V; MARTINS, B.F.M; AMORIM, L.L.G; ALMEIDA, F.P. **Comportamento Da Percolação De Poluentes Hidrocarbonetos Em Função Da Textura Do Solo**. In: Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, V, 2014, Belo Horizonte.

FORCHHEIMER, P. Wasserbewegung durch Boden [Movimento da água através do solo]. **Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure**, v. 45, n. 49, p. 1736-1741, 1901a.

FORCHHEIMER, P. Wasserbewegung durch Boden [Movimento da água através do solo]. **Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure**, v. 45, n. 50, p. 1781-1788, 1901b.

FORTUNA, A.O. **Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos: conceitos básicos e aplicações**. 2ª ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2012. 552 p.

FRANÇA, A..C..**Escoamento em Meios Porosos; Uma Análise Teórica e Experimental dos Efeitos dos Esforços Capilares Provocados por Percolação de Água em Elementos de Alvenaria**. 2000. 65f. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica – Transmissão e

conversão de Energia) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, UNESP, Guaratingueta, 2000.

FRANCIS, F. O. **Hidráulica de Meios Permeáveis; Escoamento em meios porosos**. Rio de Janeiro: Interciência, 1980, 169 p.

GÓMEZ, D.A.O. **Modelagem de Problemas de Fluxo na Escala Granular Usando o Método Lattice Boltzmann**. 2013. Dissertação (mestrado em Geotecnia) – Faculdade de Tecnologia- Departamento de Engenharia Civil- Universidade de Brasília, UnB, Brasília, 2013.

HIRSCH, C. 2007. **Numerical Computation of Internal and External Flows: The Fundamentals of Computational Fluid Dynamics**. P. 680. Butterworth-Heinemann, Oxford.

KRAFT, R., & YAAKOBI, D. (1966). **Some remarks on non-Darcy flow**. Journal of Hydrology, 4, 171– 181.

LOFRANO, F.C. **Escoamento em meios porosos: um modelo analítico não darciano baseado no Princípio da Entropia Máxima**. 2018. 235 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018)

MAITELLI, C. W. S. P. **Simulação do Escoamento Monofásico em um Estágio de uma Bomba Centrífuga Utilizando Técnicas de Fluidodinâmica Computacional**. 2010. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Petróleo) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

NASCIMENTO, S. M. et al. **Estudo da Dinâmica de Partículas em tambor rotatório com suspensores: Análise experimental e numérica utilizando abordagens euleriana e lagrangeana**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

NAVIER, C.L.M.H. Mémoire sur les lois du mouvement des fluides [Memorando sobre as leis do movimento dos fluidos]. **Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France**, v. 6, p. 389-440, 1823.

OLIVEIRA, E.B. **Variações da permeabilidade ao óleo em praias arenosas do sistema Patos Guaíba**. Universidade Federal do Rio Grande, Instituto de oceanografia programade pós-graduação em oceanografia física, química e geológica, 106p, 2016.

PENA, P.G.L; NORTHCROSS, A.L; LIMA, M.A.G; RÊGO, R.C.F. **Derramamento de óleo bruto na costa brasileira em 2019.** *Cadernos de Saúde Pública*, v. 36, n. 2, 2020.

ROSA, A. J. **Engenharia de Reservatórios de Petróleo.** Ed. Interciência, RJ, 2006.

RUBENSTEIN, David A.; D.FRAME, Mary; YIN, Wei. **Biofluid Mechanics: An Introduction to Fluid Mechanics, Macrocirculation, and Microcirculation.** -: Academic Press, 2015.

SCHEIDEGGER, A.E. **The Physics of Flow Through Porous Media.** 2nd ed. London: Oxford University Press, 1960. 313 p.

STOKES, G.G. On the theories of internal friction of fluids in motion and of the equilibrium and motion of elastic solids. **Transactions of the Cambridge Philosophical Society**, v. 8, p. 207-305, 1845.

VAN WACHEM, B. G. M.; SCHOUTEN, J. C.; VAN DEN BLEEK, C.M.; KRISHNA, R.; SINCLAIR, J. L. **Comparative analysis of CFD models of dense gas-solid systems.** *AIChE Journal*, v. 47, n. 5, p. 1035-1051, 2001.

WANG, C.A; SHEN, T.R; GAO, J.P; TAN, J.Y., **Development of RTE solver for radiative transfer in absorbing-emitting medium using finite volume based CFD library OpenFOAM.** *International Journal of Thermal Sciences*, 140, 36–42, 2019.

YU, P. et al. **Characterization investigation on pore-resistance relationship of oil contaminants in soil porous structure.** *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 191, 2020.

ZIENKIEWICZ, O. C. O., TAYLOR, R. L. R. & ZHU, J. J. Z. 2005a. **The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals.** P. 752 (Sixth). Elsevier/Butterworth-Heinemann, Oxford.

ZIENKIEWICZ, O. C., TAYLOR, R. L. & NITHIARASU, P. 2005b. **The Finite Element Method for Fluid Dynamics.**