

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS - UFAL
CENTRO DE TECNOLOGIA - CTEC
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
ENGENHARIA DE PETRÓLEO – EPET

SDNEY GABRIEL RODRIGUES SANTANA

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PERFIL DE CONTAMINAÇÃO DE PETRÓLEO E
DERIVADOS EM MEIOS POROSOS NÃO CONSOLIDADOS**

MACEIÓ-AL
2022

SDNEY GABRIEL RODRIGUES SANTANA

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PERFIL DE CONTAMINAÇÃO DE PETRÓLEO E
DERIVADOS EM MEIOS POROSOS NÃO CONSOLIDADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia de Petróleo da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Petróleo.

Orientador: Prof. Dr. Rodolfo Junqueira Brandão

Coorientador: Prof. Dr. Kleber Jean Leite Santos

MACEIÓ-AL

2022

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

S232s Santana, Sdney Gabriel Rodrigues.
Simulação numérica do perfil de contaminação de petróleo e derivados em meios porosos não consolidados / Sdney Gabriel Rodrigues Santana. – Maceió, 2022.
74 f. : il.

Orientador: Rodolfo Junqueira Brandão.
Co-orientador: Kleber Jean Leite dos Santos.
Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia de Petróleo) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2022.

Bibliografia: f. 70-74.

1. Petróleo - Contaminação. 2. Escoamento. 3. Óleos. 4. Areia. 5. Darcy-Forchheimer, Modelo. 6. Porosidade. I. Título.

CDU: 665.7

RESUMO

Diante da ainda crescente influência do mercado do petróleo na geopolítica global, e sob a perspectiva dos potenciais riscos ambientais que essa indústria carrega consigo, o presente trabalho se propõe a avaliar numericamente, por meio de simulação computacional, o perfil de contaminação observado em um problema de escoamento de óleo sobre leito poroso não consolidado, compreendendo todas as propriedades inerentes aos elementos participantes do sistema, bem como as considerações adotadas pela fluidodinâmica computacional para o delineamento e construção de um modelo representativo aos fenômenos ocorrentes nos casos de vazamento de óleo e seus derivados, e aos dados e ensaios encontrados na literatura. Passando pela seleção de materiais e caracterização de suas propriedades estruturais e reológicas, a simulação em foco neste trabalho reproduz um sistema formado por dois cilindros concêntricos, sendo um maior, cumprindo o papel do meio poroso não consolidado, e um menor, representando a injeção contínua de óleo. Decidiu-se por construir o modelo no resolvidor *OpenFOAM* e tendo como base uma condição média nas características da areia (densidade, granulometria, permeabilidade e porosidade) e do óleo (densidade e viscosidade), validou-se o modelo numérico e, posteriormente, variou-se essas características a fim de se observar a influência de cada uma sobre o comportamento fluidodinâmico do escoamento. Como resultado, observou-se que o derivado mais pesado (maior densidade e viscosidade) se espalhou mais e se aprofundou menos no leito do que o óleo leve (menor densidade e viscosidade), que por sua vez desenvolveu um perfil mais avançado na direção axial.

Palavras-chave: Contaminação. Solo. Escoamento. Óleo. Areia. Darcy-Forchheimer. Meio Poroso.

ABSTRACT

Faced with the growing influence of oil market in global geopolitics and considering the perspective of the potential environmental risks that this industry provides, this current study proposes to numerically evaluate, by computer simulation, the contamination profile in an oil flow problem, understanding all of the element's properties, and how it impacts the oil flow behavior. Starting from the master's thesis named as "Analysis of Flow Behavior of Petroleum Derivatives in Sandy Soil on the Coast of Alagoas". Going through the material selection and description of its structural and rheological properties, a simulation in focus in this work, reproduces a system formed by two concentric cylinders, one, fulfilling the role of the unconsolidated porous medium, and a smaller one, representing the continuous injection of oil. Having tried to simulate the model through the ANSYS simulator, resulted in a slow and high processing cost model. To overcome this obstacle, it was decided to build the model in the OpenFOAM solver, which makes it possible to parameterize a lightest model, without necessarily losing accuracy. Based on the sand bed characteristics (density, average granulometry, permeability and porosity), the numerical model was validated and later it was varied to observe the influence of these properties on the fluid dynamic behavior. As a result, it was possible to check that the heavier derivate leaked the most on the radial direction than on the axial direction. On the other way, the lightest derivate developed the flow mostly on the axial vertical direction than on the radial direction.

Keywords: Oil contamination. Sand bed. Soil. Darcy-Forchheimer. Oil Flow.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	9
2.1	Meio poroso	9
2.2	Permeabilidade de um meio poroso	10
2.3	O petróleo e suas propriedades	10
2.4	Escoamento multifásico de fluidos imiscíveis em meio poroso	11
2.5	Equação da continuidade	12
2.6	Hipótese do contínuo	12
2.7	Sistemas particulados	13
2.7.1	Abordagem euleriana	14
2.7.2	Equação de Navier-Stokes	14
2.7.3	Número de Reynolds e o regime de fluxo	14
2.8	Fluidodinâmica computacional	15
2.8.1	Método dos elementos finitos	16
2.8.2	Método dos volumes finitos	16
2.9	OpenFOAM	17
3	METODOLOGIA	20
3.1	O trabalho de Dória e o delineamento do problema	20
3.1.1	Coleta e caracterização dos leitos arenosos	21
3.1.2	Seleção e caracterização dos óleos	22
3.1.3	Modelo de bancada	24
3.1.4	Delineamento do problema	24
3.2	Modelagem no ANSYS <i>Fluent</i>	26
3.2.1	Geometria e malha	27
3.2.2	Os materiais e suas propriedades no <i>Fluent</i>	30
3.2.3	O modelo multifásico	32
3.2.4	Número de Reynolds e o regime de fluxo (modelo viscoso)	33
3.2.5	As condições de contorno	34
3.2.6	O empacotamento do leito arenoso	34
3.2.7	A simulação e o problema de custo computacional	35
3.3	Modelagem no OpenFOAM	37

3.3.1	Estrutura dos dados do OpenFOAM	38
3.3.2	Criação da geometria e malha	40
3.3.3	As definições físicas	43
3.3.4	Os parâmetros de simulação	45
3.3.5	Calibração do modelo	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
4.1	Modelo <i>Fluent</i>	52
4.2	Modelo OpenFOAM	56
4.2.1	A malha	56
4.2.2	Calibração do modelo	56
4.2.3	Influência das propriedades do óleo no escoamento	64
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	69
	REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

O petróleo, como um dos commodities mais relevantes no cenário da geopolítica global, é um recurso essencial à sociedade não só pelo seu potencial de geração energética. Seus subprodutos são matéria prima para fabricação e uma gama de bens de consumo (MARIANO, 2007). Por outro lado, em toda sua cadeia produtiva, o petróleo está associado a diversos impactos ambientais desde o desmatamento, alteração dos ecossistemas, lançamento de resíduos em corpos hídricos, derramamento, entre outros (DOS SANTOS et al., 2012).

Buscando não apenas compreender as interações com o meio, mas também viabilizar técnicas e tecnologias mitigadoras, os estudos sobre o alto risco e o elevado potencial contaminante do petróleo têm se intensificado, principalmente com foco nos impactos ambientais causados por acidentes e/ou derramamentos. As avaliações de impactos ambientais ocorrem por meio do diagnóstico ambiental da área sob influência do empreendimento e suas atividades, mapeando-se os meios geográfico, biológico e socioeconômico da região e, posteriormente, avaliando-se os efeitos positivos e negativos nela incidentes (MARTINS et al., 2015).

Entretanto, tragédias envolvendo contaminação por petróleo podem atingir escalas muito maiores, como ocorreu em agosto de 2019 no litoral do nordeste brasileiro, que, segundo o Ministério Público Federal, tratou-se do maior desastre ambiental da história do país em termos de extensão e atingiu mais de 2.000 km da costa litorânea, afetando 675 localidades de 116 municípios, incluindo os nove estados do nordeste e o Espírito Santo (BRASIL, 2019). Como consequências diretas e indiretas do desastre, as comunidades pesqueiras das regiões atingidas e proximidades ficaram impedidas de pescar e comercializar mariscos, ostras, mexilhões, peixes e caranguejos, o que causou significativo impacto socioeconômico nas comunidades, que sofreram um prejuízo entre 80% e 100% em comparação ao mesmo período no ano anterior (ARAÚJO; RAMALHO; MELO, 2020).

Além dos impactos causados à fauna e à flora marítima, bem como às comunidades dependentes desses ecossistemas, há preocupações pertinentes à contaminação do solo. O petróleo, por se tratar de uma mistura complexa de hidrocarbonetos, acarreta complicações no tratamento e na remediação dos locais atingidos, uma vez que alguns contaminantes presentes na mistura se destacam

frente a outros em termos de toxicidade e características físicas, como, por exemplo, a solubilidade em água (ANDRADE; AUGUSTO; JARDIM., 2010).

O principal objetivo deste trabalho é investigar o potencial contaminante de alguns derivados do petróleo no que diz respeito à capacidade de se alastrar por meio poroso não consolidado (leito de areia), a fim de avaliar a hipótese de contaminação por petróleo e/ou seus subprodutos em solo e águas subterrâneas, a partir do estudo do comportamento da percolação do óleo nas direções axial e radial, utilizando-se de sítios modelados computacionalmente e simulação numérica.

Portanto, pretende-se avaliar numericamente o avanço da fase contaminante no meio poroso e investigar as influências das diferentes propriedades físicas do problema, como a viscosidade e densidade (óleo) e granulometria (areia). Em seguida, avalia-se os perfis de contaminação para cada caso, a fim de se mensurar o potencial contaminante do petróleo e seus derivados em diferentes ambientes deposicionais em relação à capacidade de se alastrar em meios porosos, de acordo com o tempo de exposição.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para compreender o condicionamento do problema proposto neste trabalho, é importante compreender determinados conceitos pertinentes, além de se definir relações essenciais que servem como base para o estudo e a obtenção dos resultados esperados.

2.1 Meio poroso

A porosidade, descrita por Rosa (2006) como a relação entre o volume de poros presentes em uma rocha e o volume total dela, é uma das principais propriedades estudadas pela geologia do petróleo, uma vez que é a característica das rochas que permite que o óleo seja armazenado e transportado. Portanto, entende-se como meio poroso todo corpo que possui porosidade não nula. Essa relação está representada na equação 1.

$$\varepsilon = \frac{V_{poros}}{V_{total}} \quad (1)$$

A parte sólida de um meio poroso é denominada matriz porosa, e os orifícios são chamados de espaços vazios, espaços porosos ou simplesmente poros. Uma grande variedade de materiais como espumas sintéticas e naturais, vegetais, materiais cerâmicos, filtros caseiros, reservatórios de petróleo ou mesmo uma porção de areia acondicionada em um tubo, podem ser considerados meios porosos (DULLIEN, 2012).

Um clássico exemplo de meio poroso é a rocha reservatório, responsável pelo armazenamento do petróleo, tendo ele passado pelo processo de geração e migração que leva milhares de anos. No entanto, nem tudo que possui porosidade é necessariamente uma rocha, ou mesmo precisa ser um material consolidado.

Os meios porosos são classificados como consolidados ou não consolidados, e “no primeiro, a parte sólida é fixa e separável em partes apenas através de fraturas. O segundo é formado por partículas justapostas e não coladas umas às outras, o que torna fácil a separação dessas partículas e a descaracterização do meio” (ZORZETTO, 1991, p. 8). Os poros presentes em um corpo sólido (seja ele

consolidado ou não consolidado) podem estar interconectados ou não entre si, e essa interconexão entre poros presentes em um corpo confere a propriedade denominada permeabilidade.

2.2 Permeabilidade de um meio poroso

A permeabilidade, uma das principais propriedades no estudo do escoamento em meio poroso, é caracterizada por Rosa (2006) como a capacidade que um meio poroso possui de permitir escoamento de fluido através de si, e mede, sobretudo, o grau de interconectividade dos poros distribuídos nos volumes porosos.

A equação desenvolvida por Darcy em 1856 relaciona a permeabilidade de um meio e um fluido newtoniano de viscosidade μ que flui através dele, resultando na equação geral de Darcy que calcula a permeabilidade como apresentado na equação 2:

$$k = \frac{Q}{A} \times \frac{L}{\Delta P} \times \mu \quad (2)$$

Onde k é a permeabilidade do meio, Q é a vazão de fluido escoada através dele, A e L são definidos como a área transversal do leito e seu comprimento respectivamente, ΔP a queda de pressão e μ a viscosidade dinâmica do fluido.

2.3 O petróleo e suas propriedades

A fim de compreender todos os elementos envolvidos no problema de pesquisa deste trabalho, caracteriza-se o agente contaminante, assimilando sua conceituação e as principais propriedades que o definem, cujas dimensões são capazes de impactar diretamente a observação do comportamento do escoamento avaliado. Segundo Thomas (2001), o petróleo é uma mistura complexa de hidrocarbonetos decorrentes da decomposição de matéria orgânica, e as cadeias moleculares podem variar de pequenas, como o metano, até cadeias mais longas, como os asfaltenos.

A diferença de tamanho e a quantidade de átomos presentes nas moléculas do petróleo, bem como a proporção de cada um dos componentes na mistura, ocasionam naturalmente uma variação nas propriedades associadas ao fluido, como peso

específico, viscosidade, solubilidade, cor, toxicidade, e até mesmo estado físico. Havendo, por exemplo, uma quantidade proeminente de moléculas de cadeia mais curta, tem-se o petróleo majoritariamente no estado gasoso; se houver, por outro lado, predominância de componentes de cadeia mais complexa, tem-se o óleo mais pesado ou um material em estado sólido (ROSA, 2006).

A viscosidade é uma propriedade reológica de um fluido caracterizada pela sua resistência ao escoamento, ou seja, quanto maior a viscosidade de um fluido, maior a sua resistência ao fluxo (SILVA et. al, 2018). Além do óleo, objeto de estudo deste trabalho, pode-se citar o mel de abelha como exemplo de fluido viscoso, que possui alta viscosidade. Esta propriedade pode ser avaliada quantitativamente em laboratório com o auxílio de um viscosímetro.

A viscosidade dinâmica de um fluido (μ) é uma constante de proporcionalidade entendida por Newton ao observar que a tensão de cisalhamento era proporcional à diferença de velocidade apresentada entre cada camada imaginária de fluido. Um fluido cuja viscosidade dinâmica não varia com o tempo ou sob condições a ele impostas é denominado fluido newtoniano, enquanto fluidos cuja viscosidade varia são classificados como não-newtonianos (BRUNETTI, 2008). Já a viscosidade cinemática ν está associada à razão entre a viscosidade dinâmica do fluido e sua massa específica, como demonstra a equação (3).

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3)$$

2.4 Escoamento multifásico de fluidos imiscíveis em meio poroso

De acordo com Guimarães (2014, p. 24), em um escoamento em meio poroso, “os poros são ocupados por uma ou mais fases. Se dois fluidos são imiscíveis, dificilmente se misturarão em nível molecular e terão uma interface bem definida entre as duas fases”, entretanto, nada impede que possam coexistir no volume poroso. Sendo assim, uma fase pode se comportar como obstáculo para o fluxo de outra ou até servir como condúite, de modo a facilitar o escoamento (GUIMARÃES, 2014).

O fluxo de fluidos imiscíveis em meio poroso pode ser categorizado como regime permanente, no qual as propriedades do sistema se mantêm invariáveis ao longo do tempo, ou como regime transiente, quando as propriedades interagem entre

si e se transformam durante o tempo de fluxo. Por fim, no estudo do escoamento multifásico de fluidos imiscíveis, considera-se os efeitos da permeabilidade relativa, bem como molhabilidade, capilaridade, forças viscosas e estrutura porosa (DULLIEN, 2012).

No presente estudo, com o avanço da saturação do meio poroso com o tempo, espera-se alterações nas propriedades do sistema, sob uma perspectiva macroscópica, principalmente ao se considerar que as fases podem se deslocar em sentidos opostos entre si.

2.5 Equação da continuidade

Partindo do preceito da conservação das massas, trabalhou-se, de acordo com Campos (2013), a Equação da Continuidade (4), que relaciona a velocidade do escoamento laminar de um fluido com a área da sessão transversal do meio no qual ele escoar.

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho c \phi dV + \int_{\partial\Omega} F n ds = \int_{\Omega} \rho c \omega dV \quad (4)$$

Sendo ρ a densidade do componente, c a concentração volumétrica, F o fluxo de massa pela fronteira do domínio Ω , n o vetor normal exterior unitário, e ω o termo de fonte (ou sorvedouro) de massa.

2.6 Hipótese do contínuo

A partir dos estudos físicos e químicos da matéria, compreende-se que o fluido é composto por moléculas em constante movimento; contudo, na maioria das aplicações, como no âmbito da engenharia, por exemplo, convém focar nos estudos das propriedades macroscópicas de uma população de moléculas, corroborando Campos (2013, p. 17), que afirma que um fluido deve ser tratado “como algo arbitrariamente divisível, algo contínuo”, desconsiderando o comportamento das moléculas individuais. Sendo assim, entende-se a perspectiva denominada hipótese do contínuo como a base da mecânica dos fluidos clássica, que se relaciona de

maneira implícita com todos os métodos e conceitos aplicados na fluidodinâmica computacional (CAMPOS, 2013).

2.7 Sistemas particulados

Para o estudo de sistemas que envolvem o fluxo de fluido em meios porosos não consolidados, há uma ramificação da ciência das operações unitárias que dedica recursos à caracterização dos sistemas particulados, bem como suas interações com o fluido transferido através deles. Nesse âmbito, há uma preocupação relacionada aos fenômenos de interação sólido-fluido e sólido-sólido, uma vez que os sistemas se constituem das operações envolvendo escoamento de fluidos através de leitos fixos ou móveis de partículas, como operações de transporte, mistura, separação de partículas por ciclones, hidrociclones e filtração, por exemplo. Sendo assim, a ciência dos sistemas particulados tem como próprio núcleo a definição das características gerais de uma partícula ou de uma população de partículas envolvida na operação unitária ou no problema físico (CREMASCO, 2014).

Dessa forma, para melhor descrever os fenômenos físicos envolvidos no escoamento de óleo em leito de areia, é essencial que se realize um estudo geral das propriedades do meio poroso da caracterização das partículas nele contidas, como a distribuição granulométrica, o arranjo e a estrutura dos poros (PECANHA, 2014). Assim, é possível destrinchar as formas de interação tanto das partículas que compõem o meio entre si, quanto delas com o fluido, que, no presente trabalho, entende-se como agente contaminante.

Nos ensaios fluidodinâmicos envolvendo fluxo de fluido em leito particulado, seja fixo ou fluidizado – quando o leito está livre para movimentação de suas partículas e rearranjo estrutural –, a fase fluida é descrita pela equação de Navier-Stokes a partir de um referencial euleriano, enquanto para fase particulada se lança mão da teoria das misturas da mecânica do contínuo e se considera, portanto, que a população de partículas assume comportamento de fluido hipotético que, conseqüentemente, é descrito também pela ótica euleriana, utilizando-se a equação de Navier-Stokes. (CREMASCO, 2014).

2.7.1 Abordagem euleriana

Aplicando-se as equações de conservação de massa e de quantidade de movimento para as fases sólidas e contínuas num problema de escoamento de fluido em meio poroso granular, considera-se que o material particulado assume o comportamento de um fluido (ARAÚJO; RAMALHO; MELO, 2020). Além disso, esta abordagem introduz o conceito de fração volumétrica como sendo a quantificação da presença de cada fase contínua no meio, que pode variar entre zero e um (CHIESA et al., 2005).

Já que na modelagem euleriana a fase sólida também é tratada como contínua, determinadas propriedades da fase granular devem ser adicionadas a ela por meio da teoria cinética granular (modelo euleriano granular multifásico), que, baseada na teoria cinética dos gases, acrescenta ao contexto do problema o conceito de pressão de sólidos. Considera-se, para o regime de escoamento de sólido (neste caso, a areia), que a fração volumétrica não é menor, em nenhum ponto de análise, do que o limite de empacotamento, e, dessa forma, caracteriza-se a fase sólida como incompressível (NASCIMENTO, 2018).

2.7.2 Equações de Navier-Stokes

As equações de Navier-Stokes possuem uma gama de aplicações nas mais diversas áreas da ciência e são equações diferenciais parciais que descrevem o escoamento de fluidos, a partir das quais determina-se os campos de velocidade e de pressão num problema de escoamento (SOUZA, 2013). Considerando o escoamento de fluidos newtonianos incompressíveis, tem-se que o traço do tensor gradiente é nulo e levando em conta a equação (3), a equação de Navier-Stokes se apresenta em sua forma mais conhecida, representada em (5) (FERNANDES; MOREIRA, 2018).

$$\frac{\partial}{\partial t} u + u \nabla \cdot u = f - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 u_i \quad (5)$$

2.7.3 Número de Reynolds e o regime de fluxo

A partir de estudos experimentais da avaliação do comportamento do escoamento de fluidos em tubulações, Osborne Reynolds, de acordo com Lofrano (2018), percebe uma relação do regime de fluxo não só com a velocidade do escoamento, mas também com as características dos dutos empregados no arranjo, bem como com as propriedades do fluido. Além disso, Reynolds sintetiza uma propriedade adimensional Re associada à equação de Navier-Stokes, conforme (6).

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} = \frac{UL}{\nu} \quad (6)$$

Onde Re representa o número de Reynolds, U refere-se à velocidade característica e L ao comprimento característico. É, portanto, uma razão direta entre as forças inerciais e forças viscosas que atuam em um determinado sistema envolvendo escoamento.

Aplicando-se ao estudo de escoamento em meio poroso, Innocentini (2000) entende que os efeitos inerciais ou cinéticos sobre a queda de pressão são causados pela turbulência do fluido escoante e/ou pela tortuosidade do meio poroso, e, assim, é possível determinar (7).

$$Re = \frac{\rho V_s d_{poro}}{\mu} \quad (7)$$

Sendo V_s a velocidade pontual do fluido no interior do poro, e d_{poro} o diâmetro do poro. Assim, o número adimensional de Reynolds obtido pode ser menor que 2.300, caracterizando um fluxo com regime laminar; maior que 4.000, que determina o regime de fluxo turbulento; e, para os casos pertencentes ao intervalo entre os dois valores, encontra-se o regime de transição (HUERTAS, 2014).

2.8 Fluidodinâmica computacional

O nicho científico dedicado ao estudo dos escoamentos apresenta três ferramentas para modelagem e estudo comportamental dos problemas, utilizando diferentes abordagens com vantagens e desvantagens que podem ser combinadas em paralelo, para fim de validação, ou em série, como etapas de um estudo de caso. Neste trabalho, explora-se apenas a abordagem numérica, desconsiderando as outras duas, analítica e experimental (laboratorial ou *in situ*) (LOFRANO, 2018).

A fluidodinâmica computacional (doravante CFD) é definida pela análise de sistemas de equações diferenciais parciais envolvendo problemas de escoamento de fluidos, transferência de calor e demais processos. Utiliza-se, de métodos numéricos e simulações computacionais, com a finalidade solucionar o cálculo das temperaturas, pressões e velocidades, ou até perfis de escoamento, partindo de condições iniciais e de contorno que delimitam o problema físico. Essa técnica se vale dos avanços tecnológicos e possibilita a implementação das equações de conservação de massa, quantidade de movimento e de energia aplicadas ao escoamento, além das equações de estado vinculadas ao problema, visando, a partir de simplificações e considerações, obter resultados satisfatórios enquanto fidelidade ao comportamento físico real observado nos fenômenos de transporte (MAITELLI, 2010).

Atualmente, o mercado disponibiliza uma variedade de softwares de simulação em fluidodinâmica, tais como ANSYS *Fluent*, Flow3D, OpenFOAM, e a categoria de análises computacionais é considerada uma ferramenta essencial no estudo dos comportamentos fluidodinâmicos, principalmente pelo grande potencial de processamento provido pelas máquinas modernas. Apesar de distintos, os softwares utilizam dois métodos principais para a resolução de problemas: método dos elementos finitos e o método dos volumes finitos.

2.8.1 Método dos elementos finitos

Os modelos matemáticos servem para a compreensão dos sistemas físicos pela utilização de métodos numéricos, como o método dos elementos finitos, que foi desenvolvido para análise de meios contínuos e pode ser empregado na maior parte dos sistemas físicos dos quais tratam as engenharias (SORIANO, 2003). Segundo Lotti et al. (2006), consiste em um método matemático no qual um meio contínuo é

discretizado em elementos que mantêm as características do sistema original, sendo aplicado em áreas como a odontologia e o cálculo de estruturas, bem como na fluidodinâmica computacional.

2.8.2 Método dos volumes finitos

O método dos volumes finitos (doravante FVM), é uma técnica de discretização das equações diferenciais, principalmente aplicada às leis de conservação, sejam elas elípticas, hiperbólicas ou parabólicas. É um método amplamente utilizado na modelagem de processos de transferência de calor, massa e como no caso do presente trabalho, na mecânica dos fluidos (ODONE et al., 2014).

De acordo com Peiró e Sherwin (2005), há vantagens e desvantagens que devem ser avaliadas ao se escolher o método a ser utilizado. Quando comparado ao método dos elementos finitos, o FVM se destaca pela conservação local dos fluxos numéricos, tornando-se atraente na modelagem de problemas para os quais o fluxo é importante, como na avaliação do fluxo de fluido em meios porosos. Além disso, o FVM trabalha com o conceito de volume de controle, no qual uma “célula, compreendida como uma porção volumétrica fixa do fluxo, é discretizada e analisada como literalmente um volume finito (CAMPOS, 2013).

Maitelli (2010, p. 65) afirma que “a malha ou grid será o conjunto finito de elementos formados por nós, pelos quais as informações são transmitidas [...], no caso dos volumes finitos, o domínio espacial será discretizado em volumes de controle finitos”.

Figura 1 – Malha do modelo de um impelidor



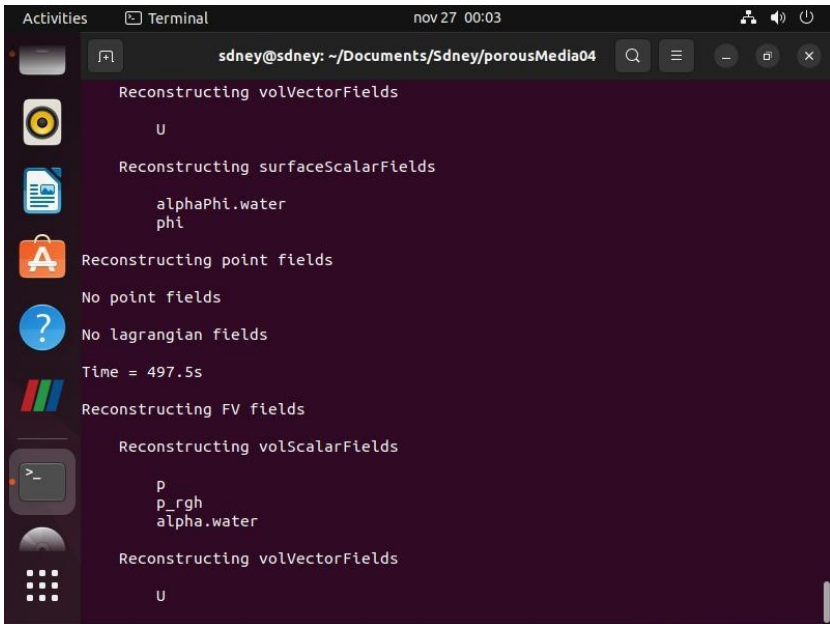
Fonte: MAITELLI (2010)

2.9 OpenFOAM

O OpenFOAM (*Open Field Operation and Manipulation*) é um software de código aberto de simulação em CFD, composto por um conjunto de bibliotecas escritas em C++ (orientada a objetos), utilizado para caracterizar e solucionar problemas de mecânica do contínuo (OPENFOAM, 2013b). A linguagem utilizada no OpenFOAM é estruturada de maneira a aproximar, de forma eficiente, a linguagem matemática à de programação, e foi uma alternativa encontrada no presente trabalho para driblar as dificuldades encaradas diante dos obstáculos computacionais.

A ferramenta trabalha em ambiente Linux, o que torna a execução do modelo e os cálculos das soluções do problema mais ágeis e resulta em um custo computacional menor quando comparada a outros resolvedores. Além disso, a ausência de uma interface gráfica torna o software mais leve, e suas características possibilitam que toda etapa de modelagem e parametrização do problema físico seja feito em linhas de código estruturadas e armazenadas em diferentes diretórios (MARIĆ; HÖPKEN; MOONEY, 2014). A fase de processamento da solução do modelo é realizada através de terminal do sistema, como mostra a figura 2.

Figura 2 – Recorte de tela (etapa de processamento)



```
sdney@sdney: ~/Documents/Sdney/porousMedia04
Reconstructing volVectorFields
U
Reconstructing surfaceScalarFields
alphaPhi.water
phi
Reconstructing point fields
No point fields
No lagrangian fields
Time = 497.5s
Reconstructing FV fields
Reconstructing volScalarFields
p
p_rgh
alpha.water
Reconstructing volVectorFields
U
```

Fonte: Autoria própria (2022)

Segundo Fernandes e Moreira (2018, p. 7), “o OpenFOAM tem implementado o método de volumes finitos como operação para discretização das equações

diferenciais parciais a serem calculadas ao longo da simulação e os resultados fornecidos são armazenados em um objeto”, e as principais equações governantes utilizadas pelo OpenFOAM serão explicitadas a seguir.

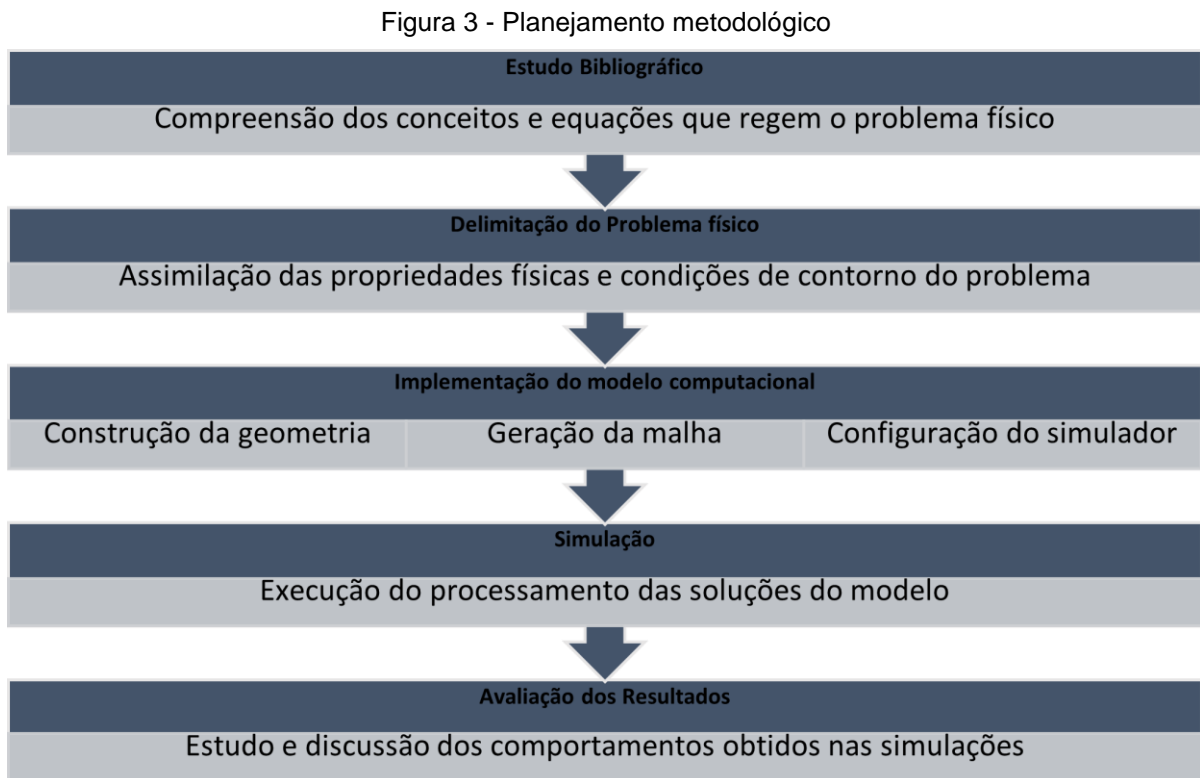
O modelo de Darcy-Forchheimer aparece como alternativa para as equações de Darcy, levando em consideração os efeitos inerciais na queda de pressão. Com o aumento da velocidade, o modelo em questão resulta em soluções mais satisfatórias em relação ao modelo de Darcy (INNOCENTINI, 2000). Partindo da equação de Navier-Stokes, o meio poroso é modelado, segundo Hafsteinsson (2009), com a atenuação da derivada do tempo e a implementação de um termo S_i para caracterizar a perda de carga (equação 8). O termo contempla a perda viscosa e a perda inercial, resultando na equação 9, sendo D e F os escalares conhecidos pela contribuição de Darcy e de Forchheimer, respectivamente, e α a porosidade do leito. Dessa forma, o modelo de Darcy-Forchheimer é o padrão utilizado pelo OpenFOAM na compreensão do fluxo de fluido em meios porosos (BARRETO; SOUZA, 2020).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma \rho u_i) + u_j \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial t_{ij}}{\partial x_j} + S_i \quad (8)$$

$$S_i = -(\mu D + \frac{1}{2} \rho |u_{jj}| F) u_i \quad (9)$$

3 METODOLOGIA

O presente estudo se propõe a seguir a metodologia de avaliação numérica por meio de simulação computacional do escoamento de óleo em leito poroso não consolidado, tendo como base o planejamento metodológico representado no esquema da figura 3.



Fonte: Autoria própria (2022)

3.1 Procedimento de Validação com a Literatura

Antes de discutir as condições físicas e as características gerais do problema, é fundamental pontuar que este trabalho parte da pesquisa do trabalho realizado por Dória (2022) que se tratou de ensaios laboratoriais que avaliaram a influência das propriedades físico-químicas de óleos lubrificantes, derivados do petróleo, bem como das características físicas de leitos arenosos no comportamento fluidodinâmico do escoamento, e, por conseguinte, no perfil de contaminação obtido da percolação. Para a estruturação lógica do estudo, empreendeu-se uma sequência metodológica de etapas, que serão sintetizadas a seguir.

3.1.1 Seleção e caracterização dos leitos arenosos

Para a avaliação de leitos com diferentes características, selecionou-se amostras das praias de Cruz das Almas, em Maceió, da praia do Saco, em Marechal Deodoro, e da Barra de São Miguel encontradas no trabalho de Dória (2022).

Compreendido como um dos métodos mais utilizados em sistemas particulados, o diâmetro médio de Sauter, representado pela Equação 10, determina a obtenção representativa do diâmetro médio de partículas de uma amostra, sendo x_i a distribuição de frequência, e D_i o diâmetro médio entre fração mássica passante e a retida (CREMASCO, 2012). Assim, foi possível determinar a distribuição granulométrica e, por meio da equação, calcular o diâmetro médio de Sauter para cada amostra.

$$dp_s = 1 / \left(\sum_{i=1}^n x_i / D_i \right) \quad (10)$$

A partir disso, obteve-se os dados apresentados nas figuras 4, 5 e 6 a seguir:

Figura 4 - Diâmetro Sauter da areia da Praia do Saco

D_i	X_i/D_i	$D_{Sauter} (\mu m)$
1000	0,00	3,06
1590	0,00	
890	0,00	
550	0,001	
400	0,12	
275	0,13	
200	0,078	
137,5	0,00	

Fonte: DÓRIA (2022)

Figura 5 - Diâmetro Sauter da areia da Praia da Barra da Cruz das Almas

D_i	X_i/D_i	$D_{Sauter} (\mu m)$
1000	0,00	5,06
1590	0,00	
890	0,034	
550	0,042	
400	0,10	
275	0,013	
200	0,00	
137,5	0,00	

Fonte: DÓRIA (2022)

Figura 6 - Diâmetro Sauter da areia da Praia da Barra de São Miguel

D_i	X_i/D_i	$D_{Sauter} (\mu m)$
1000	0,00	5,47
1590	0,00	
890	0,035	
550	0,06	
400	0,08	
275	0,003	
200	0,002	
137,5	0,000	

Fonte: DÓRIA (2022)

3.1.2 Seleção e caracterização dos óleos

Com o objetivo de avaliar a influência das propriedades do petróleo e seus derivados no comportamento fluidodinâmico do escoamento em leito arenoso, selecionou-se três tipos de derivados de petróleo, levando em consideração a variação de propriedades de um para outro. Sendo assim, escolheu-se os óleos 0W-20, 5W-30 e 20W-50 (Figura 7), lubrificantes automotivos (DÓRIA, 2022).

Figura 7 - Óleos lubrificantes automotivos



Fonte: DÓRIA (2022)

Além de possuírem propriedades suficientemente distintas, os óleos foram selecionados devido à fácil disponibilidade dos dados característicos de cada um dos fluidos, expostos nas fichas técnicas fornecidas pelos próprios fabricantes (Ipiranga, Dulub e Mobil Super). A partir disso, construiu-se as figuras 8, 9 e 10.

Figura 8 - Características físico-químicas do óleo lubrificante 0W-20

Característica	0W-20
Viscosidade 40°C	47,6 cSt
Viscosidade 100°C	8,75 cSt
Índice de Viscosidade	164
Ponto de Fluidez (°C)	-18
Densidade	0,8505 g/cm ³

Fonte: DÓRIA (2022)

Figura 9 - Características físico-químicas do óleo lubrificante 5W-30

Característica	5W-30
Viscosidade 40°C	64 cSt
Viscosidade 100°C	11,1 cSt
Índice de Viscosidade	167
Ponto de Fluidez (°C)	-45
Densidade	0,852 g/cm ³

Fonte: DÓRIA (2022)

Figura 10 - Características físico-químicas do óleo lubrificante 20W-50

Característica	20W-50
Viscosidade 40°C	134,7 cSt
Viscosidade 100°C	19,1 cSt
Índice de Viscosidade	161,6
Ponto de Fluidez (°C)	-18
Densidade	0,880 g/cm ³

Fonte: DÓRIA (2022)

3.1.3 Modelo de bancada

O modelo de bancada dos experimentos foi realizado a partir da utilização de um aparato cilíndrico com dimensões de diâmetro e altura de 14cm e 10cm, respectivamente, e, segundo Dória (2022, p. 27), “o aparato empregado foi

desenvolvido para os ensaios experimentais e foram levados em consideração os efeitos parede a serem evitados para modelar um problema como sólido-infinito”.

O óleo, por sua vez, foi disposto em uma pipeta em um volume de 50ml. Assim, o modelo de bancada foi traçado e concebido segundo a figura 11, composto por um cilindro para acondicionar o leito arenoso e uma pipeta para gotejar o óleo a uma vazão média de 5 ml/min.

Figura 11 - Modelo de bancada

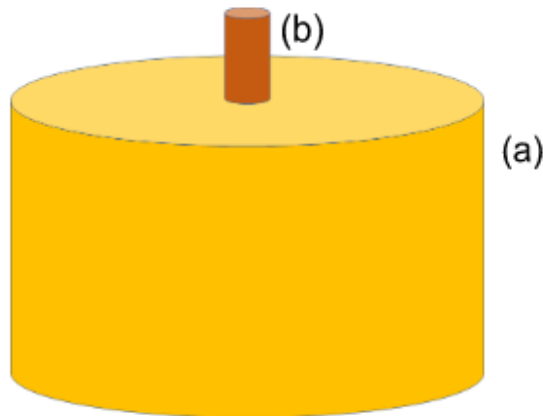


Fonte: DÓRIA (2022)

3.1.4 Delineamento do problema

Uma vez definidos os tipos de areia e de óleo e as propriedades e características gerais dos elementos envolvidos no experimento, como dimensões do cilindro, volume de óleo e vazão de injeção do fluido, delineou-se o problema a ser avaliado numericamente por meio da ferramenta computacional, conforme mostra a figura 12

Figura 12 - Esboço representativo da geometria do modelo



Fonte: Autoria própria (2022)

Com base no modelo de bancada trabalhado por Dória (2022), definiu-se a geometria do modelo como uma composição entre dois cilindros concêntricos, um maior, representando o meio poroso pelo qual acontece o escoamento do óleo, e um menor, responsável por realizar a injeção do óleo sobre o meio. O cilindro representado por (a) na figura 11 possui 10 cm de altura e 7 cm de raio, com diâmetro de 14 cm, enquanto o cilindro (b) foi definido de modo a comportar um volume de óleo equivalente a 50 ml, dimensionado, portanto, com 1 cm de raio, e diâmetro de 2 cm, com a altura h medida em centímetros. A relação apresentada na equação 9 foi utilizada para encontrar a altura do cilindro que fosse capaz comportar o volume de óleo desejado, resultando em uma altura equivalente a 7,96 cm.

$$50ml = 50cm^3 = \frac{\pi d^2}{4} \times h \quad (11)$$

Desse modo, tanto a face interior quanto a face lateral do cilindro (a) foram definidas como paredes, enquanto a face superior foi definida como abertura à atmosfera. Por outro lado, definiu-se a face superior do cilindro (b) como abertura à atmosfera e área lateral como parede; a face inferior, diferentemente do cilindro maior, possui abertura, o que estabelece contato direto com o leito arenoso pela face superior do outro cilindro. Sendo assim, o problema propunha a realização da simulação do escoamento de óleo no meio poroso ocasionado pela injeção de 50 ml de óleo contido em (b) sobre o leito arenoso contido em (a).

Quanto ao tempo amostral, avaliou-se um intervalo de 30 minutos, sendo 10

minutos para injeção de óleo, que equivale à vazão média de 5 ml/min, e os 20 minutos restantes para a avaliação do comportamento da percolação do volume injetado no interior do corpo poroso (DÓRIA, 2022).

3.2 Modelagem no ANSYS *Fluent*

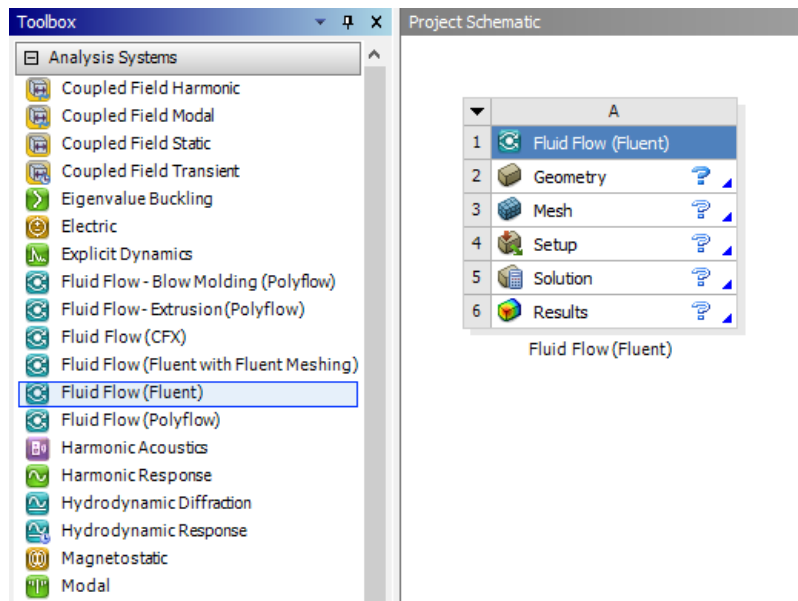
A princípio, a ferramenta computacional escolhida para a realização da simulação numérica do problema proposto foi o software ANSYS em sua versão *Student*, que é um robusto software de engenharia de simulação com ampla aplicabilidade e subsidia estudos em diversas áreas, seja para design de produtos, otimização de processos ou estudos de caso, por meio da simulação de problemas físico-químicos de diversas naturezas.

O programa é dividido em diferentes módulos, e, para o desenvolvimento do proposto problema, decidiu-se utilizar dos recursos contidos no *Fluent*, uma vez que implementa de forma eficiente não só o método dos volumes finitos, como também as equações governantes necessárias para avaliar numericamente o problema, além de possuir interface intuitiva e atrativo arcabouço instrutivo, tornando o aprendizado mais fluido (MEIER. 1998).

A figura 13, recorte da captura da tela inicial do WorkBench do ANSYS, representa a seleção do módulo *Fluent*, com as propriedades geometria, malha, configuração, solução e resultados. Assim, o simulador pré-define um fluxo lógico para a elaboração do trabalho de simulação, que passa pelas etapas em sequência, cada uma apresentando aspectos importantes na fidelidade e no ajuste do modelo implementado.

O modelo para representação do problema físico foi implementado na seguinte sequência: composição da geometria, configuração e geração da malha, criação dos materiais e aplicação de suas propriedades físico-químicas, implementação dos métodos a serem utilizados e processamento dos cálculos de solução.

Figura 13 - Recorte de tela do WorkBench ANSYS



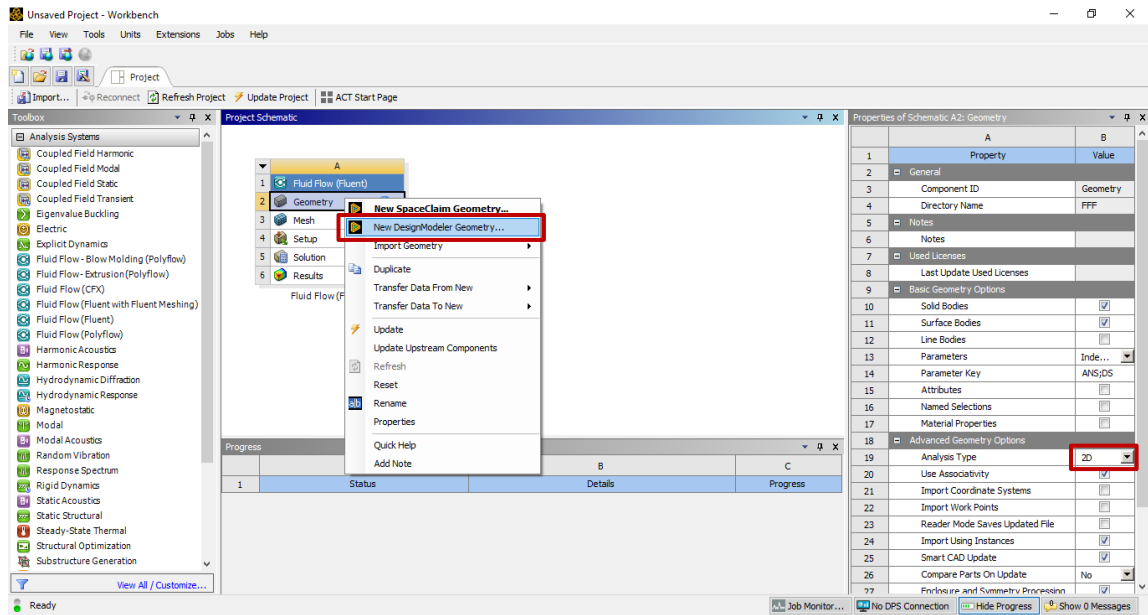
Fonte: Autoria própria (2022)

3.2.1 Geometria e malha

Dentre os aspectos discutidos por Boysan et al. (1982), a principal justificativa para a consideração da simetria do comportamento fluidodinâmico nos estudos em CFD se deve ao fato de que o ganho resultante da redução do esforço computacional se sobressai à perda de acurácia observada. Sendo assim, considerando a simplificação do modelo, principalmente no aspecto do processamento computacional, definiu-se que a geometria seria implementada no software em duas dimensões (2D), assumindo que o avanço do óleo se daria de forma radialmente simétrica, uma vez que as características porosas do meio não variam ao longo do raio dos eixos ordenados. Construiu-se, então, a geometria descrita com o auxílio da ferramenta DesignModeler, disponível no ANSYS (Figura 14).

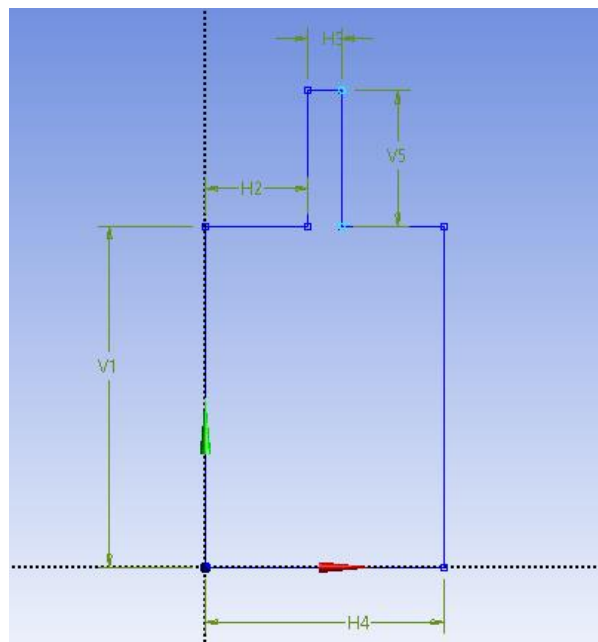
A criação do modelo no DesignModeler é de simples implementação e teve como referência os eixos cartesianos x e y (Figura 15). Foi possível adicionar dois retângulos, além de eliminar a base do retângulo menor e o topo do retângulo maior, e conectar as extremidades com linhas horizontais simples. Em seguida, definiu-se na aba *Dimensions* as dimensões V1 como a altura do cilindro maior; H2 como a distância entre aresta do cilindro maior e cilindro menor; H3 como o diâmetro do cilindro menor; H4 como o diâmetro do cilindro maior; e V5 como a altura do cilindro menor.

Figura 14 - WorkBench ANSYS



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 15 - Criação da geometria do modelo no DesignModeler



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 16 - Dimensões da geometria do modelo

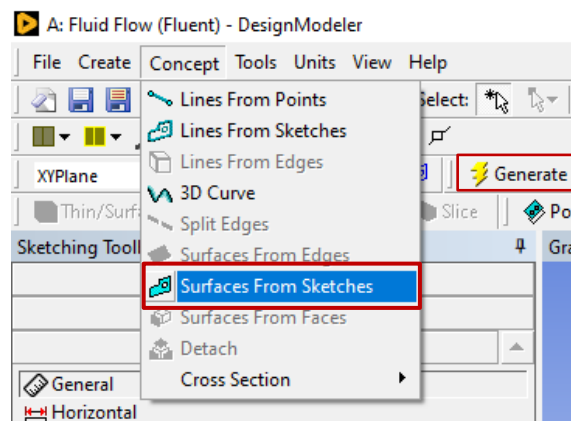
Dimensions: 5	
<input type="checkbox"/> H2	6 cm
<input type="checkbox"/> H3	2 cm
<input type="checkbox"/> H4	14 cm
<input type="checkbox"/> V1	20 cm
<input type="checkbox"/> V5	7,96 cm

Fonte: Autoria própria (2022)

Conforme o esquema apresentado na figura 16, ampliou-se a altura do retângulo maior V1 para 20 cm, para oferecer a possibilidade de aumento do tempo amostral, a fim de se ampliar as investigações.

Uma vez implementadas as linhas que formariam as fronteiras do corpo, gerou-se a superfície na qual a malha seria aplicada, acionando o menu *Concept* e, em seguida, selecionando a opção *Surfaces From Sketches* e o botão *Generate*, estabelecendo a geração da geometria proposta (Figura 17).

Figura 17 - Recorte de tela: criação da forma a partir do desenho



Fonte: Autoria própria (2022)

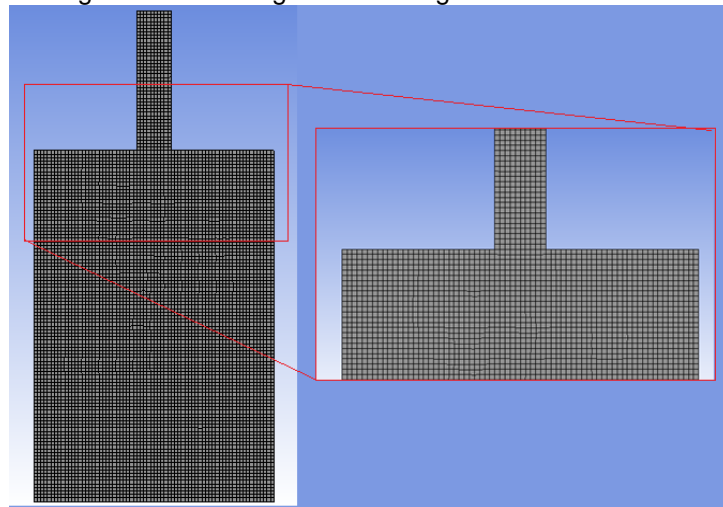
Concluída a criação da geometria, seguiu-se para a geração da malha, passo primordial para simulação de fluxo, visto que é por meio dela e seus elementos que se avalia os pequenos volumes de fluido e suas movimentações. Para isso, selecionou-se a superfície criada e se definiu o tamanho dos elementos para 0,002 m, de modo que a malha foi gerada com 7.899 elementos e 8.253 nós (Figura 18).

Figura 18 - Configurações da malha

Details of "Mesh"	
Display	
Display Style	Use Geometry Setting
Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Element Order	Linear
Element Size	2,e-003 m
Export Format	Standard
Export Preview Surface Mesh	No

Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 19 - Malha gerada sob a geometria construída

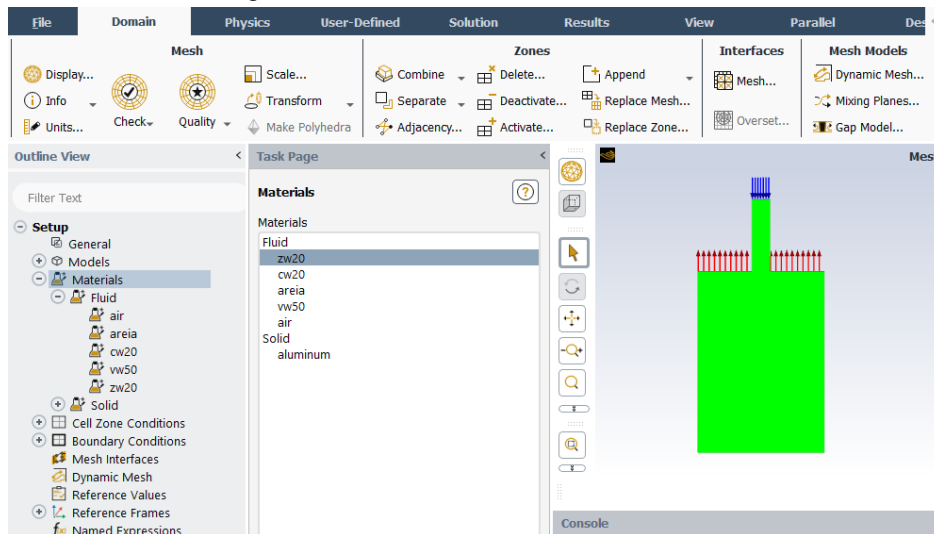


Fonte: Autoria própria (2022)

A figura 19 apresenta a malha gerada sob a geometria construída, através da qual o ANSYS *Fluent* realiza o processamento dos cálculos de transferência de massa para a obtenção do perfil de contaminação desejado, que depende da realização correta da parametrização do problema na interface do software.

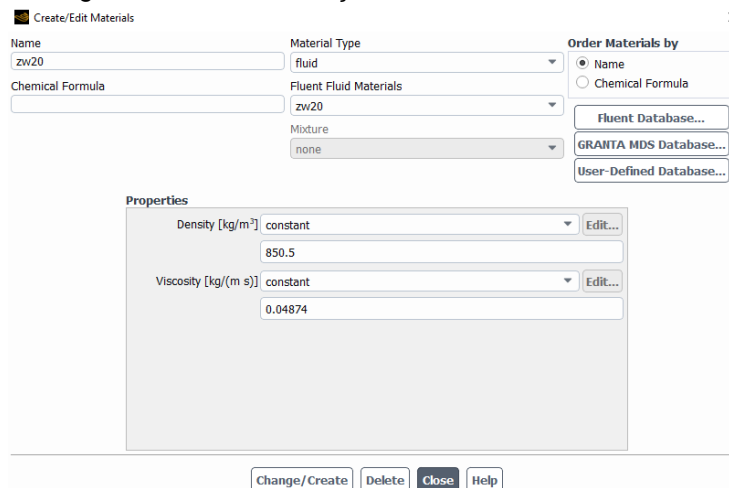
3.2.2 Os materiais e suas propriedades no *Fluent*

Visando parametrizar corretamente a modelagem computacional, é de fundamental importância que os materiais envolvidos no problema de fluxo sejam implementados de maneira coerente e respeitando suas características gerais. Assim, na interface do *Fluent*, acessando o menu suspenso *Materials* (Figura 20), foi possível criar os seguintes materiais envolvidos no escoamento: ar, presente nos poros do leito arenoso, os três tipos de óleo, e a areia como sendo o leito. Os materiais podem ser editados na janela mostrada na figura 21, inserindo os valores de densidade e viscosidade dinâmica em kg/m^3 e km/m s , respectivamente.

Figura 20 - Aba *Materials* na tela do *Fluent*

Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 21 - Parametrização do óleo lubrificante 0W-20



Fonte: Autoria própria (2022)

Vale ressaltar que, neste trabalho, o leito arenoso é abordado como fluido, respeitando-se a hipótese do contínuo. Tendo em vista que a principal característica do leito arenoso a ser avaliada é o diâmetro médio de partícula, ou seja, a influência da granulometria no escoamento, o valor utilizado para a densidade da areia foi encontrado na literatura nos estudos de Dalla Riva (2015). Além disso, o componente viscoso é trabalhado de acordo com métodos de cálculo que serão citados posteriormente. Em relação ao ar, os valores utilizados para a densidade e viscosidade estão predefinidas por padrão pelo *Fluent*, e os valores das propriedades dos materiais implementados no modelo estão listados na tabela 1 abaixo.

Tabela 1 - Densidade e Viscosidade dinâmica dos materiais

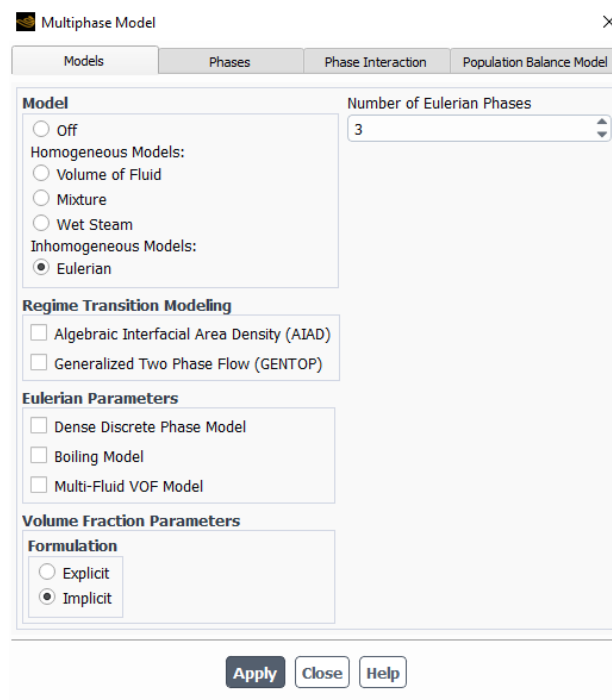
Material	dens (kg/m ³)	Vd (kg/ms)
Óleo 0W-20	850,50	0,04874
Óleo 5W-30	852,00	0,06580
Óleo 20W-50	880,00	0,14397
Ar	1,2250	1,79E-01
Areia	2500,00	-

Fonte: Autoria própria (2022)

3.2.3 O modelo multifásico

Adotou-se o modelo multifásico euleriano, configurado de acordo com as figuras 22 e 23 abaixo. Na primeira, vê-se a etapa que define que a fase arenosa deve ser calculada sob abordagem granular euleriana abrindo a possibilidade da inserção da granulometria. Além disso, escolheu-se o modelo de Syamial-Obrien para o tratamento para a viscosidade granular, uma vez que é utilizado para tratamento de leitos fluidizados. O limite de empacotamento, para este caso será de 0,63, considerando-se porosidade mínima de 37%.

Figura 22 - Configuração do modelo multifásico euleriano



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 23 - Configuração do leito granular

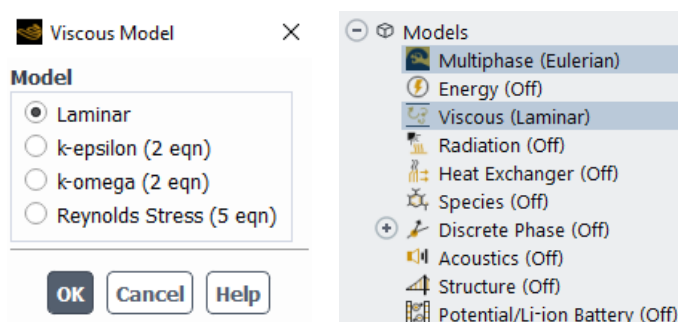
Fonte: Autoria própria (2022)

3.2.4 Número de Reynolds e o regime de fluxo (modelo viscoso)

Com base nas discussões anteriores e na equação 6, para as características fluidodinâmicas do escoamento, de acordo com as viscosidades e densidades dos fluidos, mas, principalmente, da dimensão de velocidade do fluxo e diâmetro dos canais de escoamento, tem-se que o número de Reynolds é pequeno o suficiente para se considerar o regime de fluxo como laminar (Figura 24).

Uma vez na etapa de configuração do software para configuração do modelo representativo, vale pontuar que não se prevê geração de energia, troca de calor, radiação, entre outros.

Figura 24 - Considerações gerais do modelo

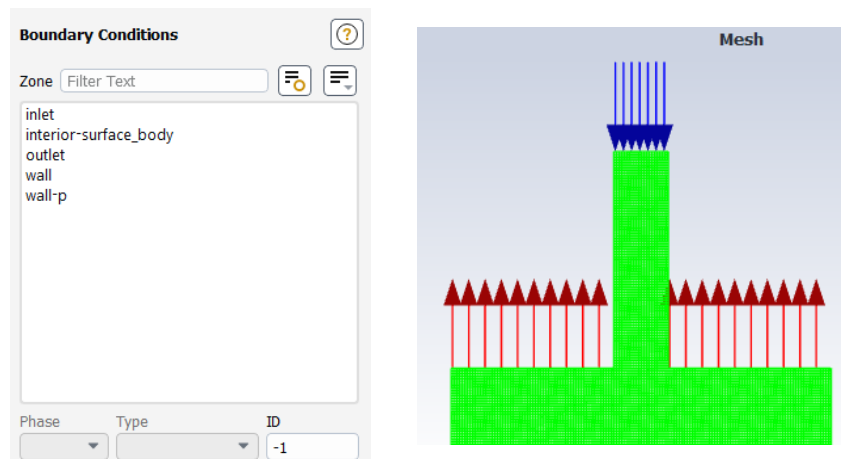


Fonte: Autoria própria (2022)

3.2.5 As condições de contorno

As condições de contorno são definidas de forma simples e direta na interface do *Fluent* (Figura 25), fazendo-se necessário apenas definir o que cada aresta representa no modelo computacional. As condições foram implementadas seguindo o que foi definido no item 3.1.4.

Figura 25 - Definição das condições de contorno



Fonte: Autoria própria (2022)

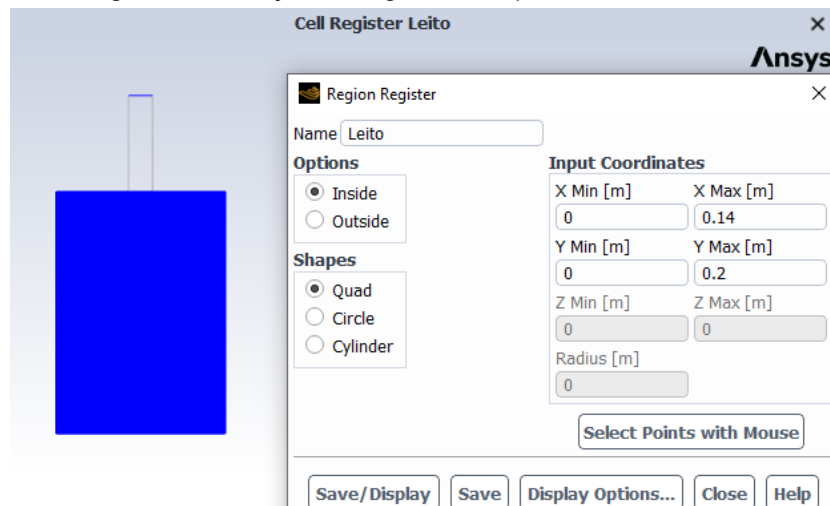
3.2.6 O empacotamento do leito arenoso

Depois de definidos os preceitos matemáticos pelos quais o simulador deve se basear para trabalhar o modelo computacional, chega-se à etapa de notificar ao *Fluent* a disposição dos materiais na geometria, executando no simulador o que Dória (2022) realizou em laboratório: empacotamento da areia no cilindro e acondicionamento do óleo na pipeta. Para isso, definiu-se as coordenadas referentes aos limites do cilindro maior para criação da região denominada “Leito”, como mostra a figura 26.

Em seguida, acionando o botão *Patch* na aba *Inicialization*, foi possível alocar todo o volume de areia na região delimitada, voltando atenção especial para a alocação da fração volumétrica adequada, considerando o limite de empacotamento definido anteriormente (Figura 27). Então, empacotando a areia a uma fração volumétrica maior que o limite de empacotamento definido, observou-se a tendência de expulsão da areia pelo *outlet* do cilindro e invasão de areia através da pipeta. Por outro lado, empacotando uma fração volumétrica menor que o limite de

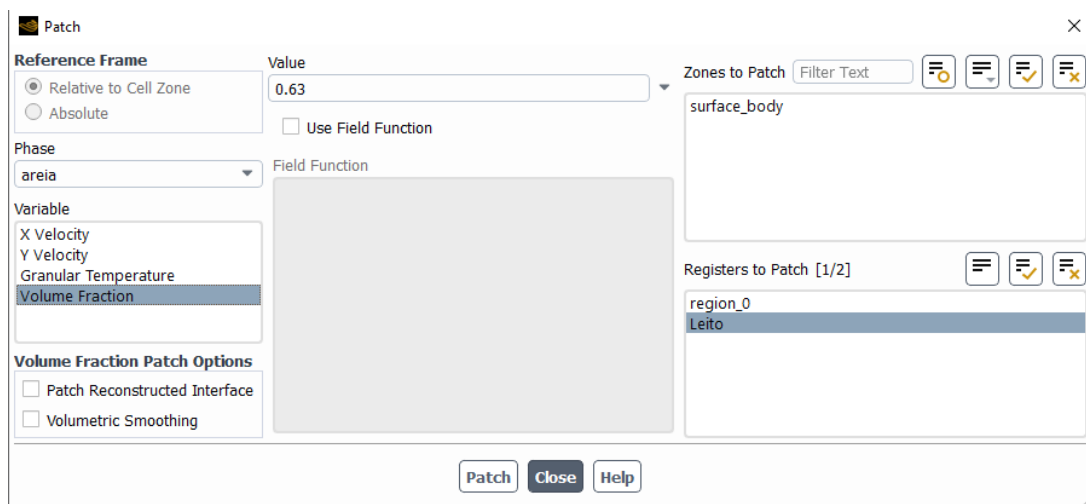
empacotamento, a tendência é que ocorra uma acomodação da areia, ocasionando uma reorganização da matriz porosa indesejada.

Figura 26 - Criação da região de empacotamento do leito



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 27 - Configuração da fração volumétrica de areia na região empacotada



Fonte: Autoria própria (2022)

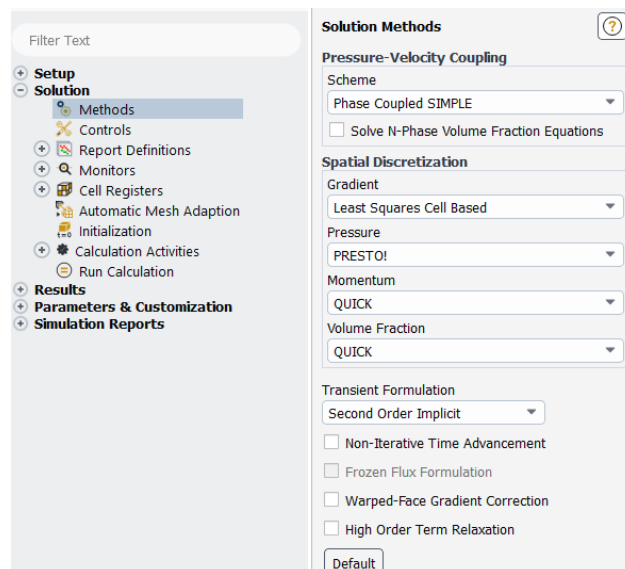
3.2.7 A simulação e o problema de custo computacional

A simulação foi realizada utilizando um notebook Dell, Core i5, com 8 GB de memória RAM, o que pode ser considerado um computador intermediário dedicado a uso pessoal. Depois da parametrização do modelo computacional de acordo com as características globais do problema físico, fez-se necessário realizar a configuração do *Fluent* quanto aos métodos de solução e algoritmos implicitamente utilizados pelo

software, para definição da estratégia e realização do processamento. Na aba *Methods*, realizou-se a seleção dos métodos e esquemas para solução de acoplamento da pressão e velocidade, e dos métodos de discretização espacial para gradiente, pressão, fração volumétrica e momento, conforme mostra a figura 28.

Escolheu-se o algoritmo SIMPLE para a solução do modelo, que, segundo Fernandes e Moreira (2019, p. 5) tem como base “o princípio de que a equação do momento linear somente irá satisfazer a equação da continuidade se, e somente se, o campo de pressões correto for determinado”. Além disso, se provou eficiente para a solução de diversos tipos de escoamento, sobretudo sob regime laminar.

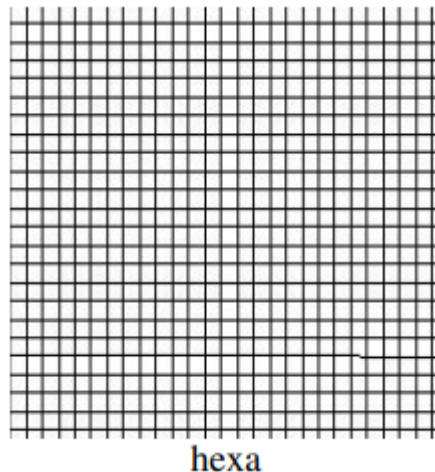
Figura 28 - Configuração da aba *Methods* no *Fluent*



Fonte: Autoria própria (2022)

De acordo com Michalcová e Kotrasová (2012), o cálculo do gradiente por *least square cell based* é recomendado para células poliédricas, enquanto o esquema QUICK é adequado para malhas de elementos Hexaédricos, como mostra a figura 29.

Figura 29 - Representação de uma malha de elementos hexaédricos (vista frontal)



Fonte: MICHALCOVÁ; KOTRASOVÁ (2012)

O trabalho de Shukla (2011) faz uma avaliação de desempenho dos esquemas numéricos utilizando métodos de simulação distintos na modelagem de ciclones e hidrociclones, e cita vantagens na utilização do esquema “PRESTO!” sobre os esquemas de segunda ordem, uma vez que apresenta resultados melhores em termos de quantidade de iterações necessárias para se atingir os critérios de divergência. Desse modo, a figura 28 é um retrato de como foram selecionados os métodos e esquemas para resolução do modelo.

Definiu-se os critérios de convergência para residuais menores que 0,001 e, para o pontapé inicial do processamento, estabeleceu-se um *time-step* (tempo equivalente a um passo de cálculo) para o valor de 1e-8 segundos; ou seja, a cada passo, o simulador calcularia a solução de fluxo para cada 0,00000001 segundo. Além disso, definiu-se o número máximo de 20 iterações por passo.

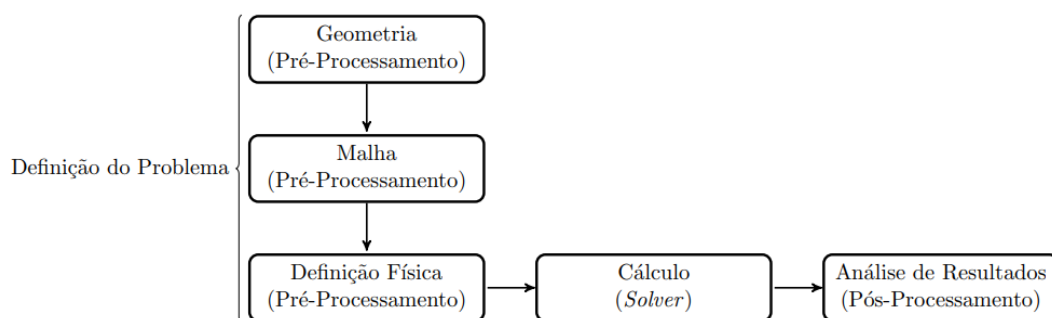
3.3 Modelagem no OpenFOAM

Diante dos obstáculos de custo computacional enfrentados com o modelo construído no ANSYS *Fluent*, discutiu-se como alternativa viável a migração do trabalho de modelagem e simulação para o resolvidor OpenFOAM, uma vez que possui características mais vantajosas que o *Fluent* em relação aos recursos de processamento. A ausência de interface robusta, a maneira como se dá a estrutura de dados, o fato de rodar em ambiente Linux, e principalmente a possibilidade de implementação de um *time-step* autoadaptativo – ou seja, a capacidade do resolvidor

de ajustar automaticamente o tamanho dos passos de cálculo com base nos erros residuais obtidos e nos critérios de convergência –, determinaram a escolha do OpenFOAM como alternativa para o desenvolvimento do presente trabalho.

Seguindo o fluxo lógico da tentativa anterior, o trabalho realizado no OpenFOAM cumpriu as etapas apresentadas na figura 30. Além disso, como o software trabalha em ambiente Linux, a utilização só foi possível com a instalação da máquina virtual VMWare com uma imagem do sistema Ubuntu em sua versão 22.04.

Figura 30 - Fluxograma das etapas da avaliação numérica em CFD

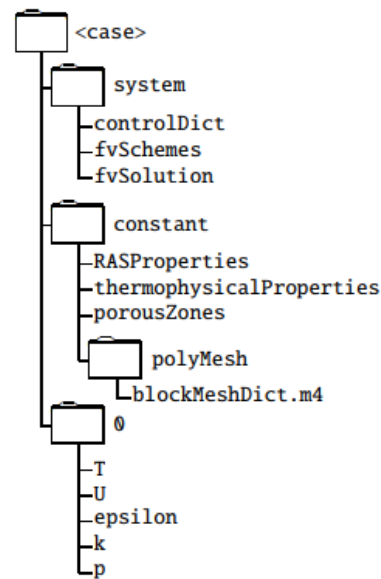


Fonte: GUIMARÃES (2014)

3.3.1 Estrutura dos dados no OpenFOAM

Antes de se detalhar as etapas percorridas no trabalho de migração entre softwares, cabe demonstrar como se organizam os dados que constituem o caso de simulação no OpenFOAM, bem como a forma como são parametrizadas todas as características do problema físico. A figura 31 apresenta um exemplo de estrutura dos arquivos e pastas que descrevem todas as minúcias intrínsecas ao problema modelado. Cada arquivo e/ou diretório contido na árvore manifesta um conjunto de propriedades, esquemas, métodos, relações e algoritmos que, quando compilados, resultam no modelo e em uma solução.

Figura 31 - Estrutura organizacional dos dados no OpenFOAM



Fonte: HAFSTEINSSON (2009)

Os subdiretórios *0*, *system* e *constant* compilam informações sobre como o resolvidor processa o modelo por meio de arquivos de texto simples, que representam, por exemplo, a descrição da geometria do problema, a malha, as condições de contorno e as propriedades físicas do meio e do(s) fluido(s) envolvidos no problema, além dos parâmetros e métodos numéricos a serem empreendidos. No subdiretório *system* constam os arquivos associados ao procedimento de solução do caso, como métodos de discretização de volumes finitos, métodos de solução de sistemas lineares, tolerância do erro e até informações de tempo de simulação e *dumping*.

A subpasta *constant* armazena os arquivos definidores das propriedades físicas pertinentes ao caso e a descrição geral da geometria e malha do modelo. O diretório *0* define as condições iniciais de campo de velocidade, pressão, gravidade, entre outras (GUIMARÃES, 2014). Vale ressaltar que, uma vez processado o modelo, juntam-se à pasta *0* todas as pastas referentes ao tempo simulado e as condições do modelo referentes a ele. Ao conjunto de pastas, se dá o nome de diretórios de tempo, e, como cada uma delas se refere a um segundo de fluxo simulado, entende-se que, na figura 32, foram processados 11 segundos de fluxo.

Figura 32 - Diretórios de tempo da simulação no OpenFOAM

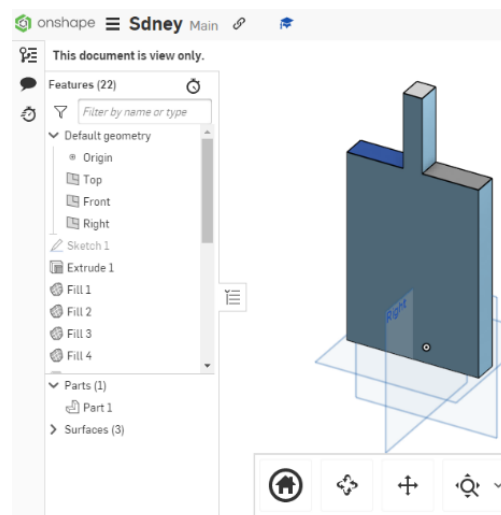


Fonte: Autoria própria (2022)

3.3.2 Criação da geometria e malha

Já que não há interface gráfica disponível no OpenFOAM, recorre-se a ferramentas externas para as etapas de criação de geometria e apreciação dos resultados, como o Onshape e o ParaView, respectivamente. O Onshape, escolhido para a geração da geometria do problema, é uma plataforma online de interface intuitiva capaz de exportar a geometria no formato suportado pelo OpenFOAM. Na figura 33, observa-se o exemplo da geometria anteriormente desenvolvida no ANSYS, rapidamente reproduzida no Onshape.

Figura 33 - Reprodução da geometria trabalhada no capítulo 3.2 (Onshape)

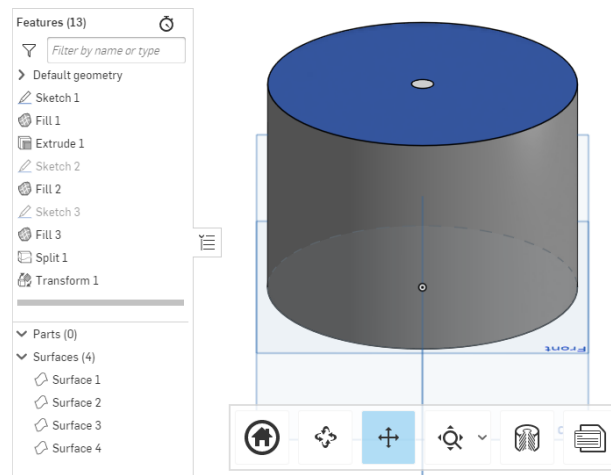


Fonte: Autoria própria (2022)

Contudo, aproveitou-se a oportunidade de repensar o modelo geométrico para aperfeiçoá-lo, buscando não apenas incrementar a representatividade e a fidelidade

ao modelo de bancada trabalhado em laboratório por Dória (2022), mas também reconsiderar perdas e ganhos em termos do custo computacional, além de retrabalhar algumas considerações físicas para otimizar a resposta final das soluções calculadas pelo OpenFOAM. Portanto, realizou-se as seguintes alterações no modelo físico e na geometria construída: (i) reprodução fiel do cilindro utilizado no modelo de bancada de Dória (2022) em termos de suas dimensões; (ii) substituição do conceito da pipeta por um simples *inlet* já acoplado ao cilindro maior. A geometria obtida (Figura 34) foi utilizada durante todo o trabalho realizado no novo resolvedor escolhido.

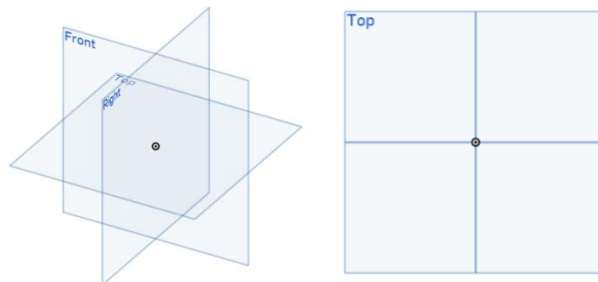
Figura 34 - Geometria redefinida segundo as considerações (i) e (ii)



Fonte: Autoria própria (2022)

Para a construção da malha na plataforma Onshape, trabalhou-se com os três planos representados na figura 35, que deram referência espacial para inserção das formas que foram utilizadas para gerar a geração.

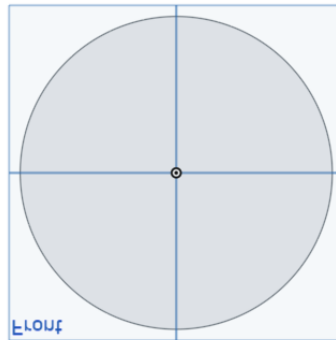
Figura 35 - Perspectivas dos planos base (Onshape)



Fonte: Autoria própria (2022)

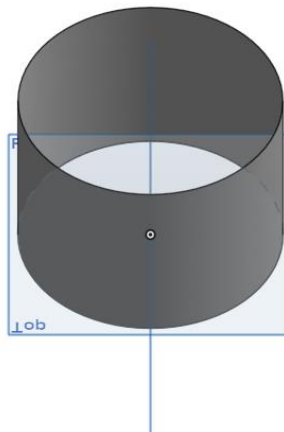
A partir disso, inseriu-se uma circunferência (Figura 36) de raio 7 cm, equivalente ao cilindro que desejou-se criar, e, posteriormente, extrudiu-se a circunferência, resultando na forma representada pela figura 37.

Figura 36 - Base do cilindro



Fonte: Autoria própria (2022)

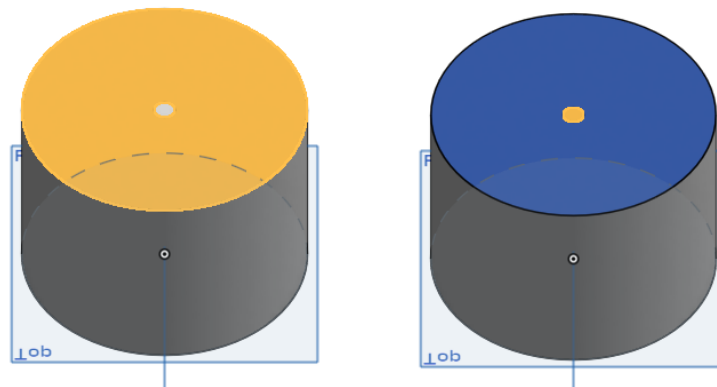
Figura 37 - Extrusão da base



Fonte: Autoria própria (2022)

Em seguida, bastou definir as faces e a área de injeção, de modo que o fundo e a área lateral do cilindro foram definidos como parede, a face superior como *outlet-vent*, ou seja, abertura à atmosfera, e a área destacada em laranja como *inlet*, ou entrada do sistema (Figura 38).

Figura 38 - Representação do *outlet* e *inlet* do modelo



Fonte: Autoria própria (2022)

Após finalizar a construção da geometria no Onshape, realizou-se a exportação e o arquivamento de cada elemento no diretório [Caso]/constant/triSurface, para posterior processamento pelo OpenFOAM como a geometria a ser trabalhada na simulação, e sobre a qual a malha será gerada. Os arquivos gerados são do formato .STL.

A malha, por sua vez, é gerada no OpenFOAM a partir do arquivo *blockMeshDict*, localizado no diretório *system*, e consiste na criação de um bloco que extrapola as dimensões da geometria criada. A partir da intersecção entre o bloco criado e a geometria existente, exportada pelo Onshape e arquivada em triSurface, gera-se o corpo representativo a ser trabalhado durante a simulação. O arquivo que recebe os elementos exportados de forma separada e cria a geometria coesa para o OpenFOAM, também está localizado na pasta *system* e é nomeado de *snappy_HexMesh_dict*, indicando a criação de elementos hexaédricos.

3.3.3 As definições físicas

Considerando as alterações realizadas na construção da geometria e da malha, em relação ao que foi desenvolvido no DesignModeler do ANSYS para a simulação da tentativa *Fluent*, redesenhou-se determinadas relações, a exemplo da forma como foi constituída a injeção contínua de óleo no leito poroso.

A partir do delineamento do problema, e de acordo com o que foi realizado nos ensaios laboratoriais de Dória (2022), o óleo é gotejado sobre o cilindro de areia a uma vazão média de 5 ml/min. Com isso, sabendo as dimensões da interface de injeção, que possui raio igual 1 cm, pode-se afirmar que:

$$Q = u \times A \quad (12)$$

Sendo Q a vazão de injeção e A a área da interface de injeção, calcula-se a velocidade de injeção u igual a 0,001061 m/s. Além disso, discutiu-se anteriormente que, após o tempo de injeção de 10 minutos (600 segundos), a injeção é interrompida para a observação do comportamento fluidodinâmico do volume injetado. O *outlet* encontrado na face superior do cilindro maior, por sua vez, consiste em abertura para atmosfera, não pressurizada. Todas as informações são imputadas no arquivo U encontrado no diretório de tempo 0, de acordo com o código da figura 39.

Figura 39 - (código referente à parametrização da injeção de óleo)

```

8 FoamFile
9 {
10     format        ascii;
11     class         volVectorField;
12     location      "0";
13     object        U;
14 }
15 // *****
16
17 dimensions      [0 1 -1 0 0 0];
18
19 internalField   uniform (0 0 0);
20
21 boundaryField
22 {
23     inlet
24     {
25         type        uniformFixedValue;
26         uniformValue    table
27         (
28             (0 (0 0.001061 0))
29             (600 (0 0 0))
30         );
31     }
32
33     outlet
34     {
35         type        pressureInletOutletVelocity;
36         value       uniform (0 0 0);
37     }
38
39     walls
40     {
41         type        noSlip;
42     }
43
44 }

```

Fonte: Autoria própria (2022)

Estabelecidas, portanto, as considerações temporais do problema, foi necessário materializar, aos olhos do resolvidor, os elementos manipulados pelo problema físico do escoamento, ou seja, o óleo, o ar e a areia como meio poroso.

No OpenFOAM, assim como no *Fluent*, o ar é definido por padrão, e suas propriedades são processadas por meio do arquivo *physicalProperties.air*, arquivado no diretório *constant*. As unidades recebidas pelo simulador estão nos padrões do Sistema Internacional, logo, as propriedades definidas para o ar no arquivo mencionado são a viscosidade dinâmica em m^2/s e a densidade em kg/m^3 , sendo $1,48\text{e-}5$ e 1 , respectivamente.

A parametrização dos tipos de óleo se deu por parte do usuário, mas assim como ocorreu com o ar, as informações foram armazenadas no arquivo *physicalProperties.oil*, salvo no diretório *constant*, que carrega as mesmas propriedades de densidade e viscosidade dinâmica.

A particularidade é fruto do meio poroso, que, no OpenFOAM, é definido de forma diferente dos outros elementos. De acordo com as explicações sobre equações governantes, o simulador toma como base o modelo de Darcy-Forchheimer para a caracterização do meio, de modo que as características permoporosas se dão por variações nos fatores D e F, respectivos termos de Darcy e Forchheimer. Essas informações são definidas no arquivo *fvmModels*, localizado na pasta *constant*, e essa relação caracteriza a maneira como se dá o gradiente de pressão, de modo que D representa a parcela viscosa e F a parcela inercial referente à queda de pressão, como discutido anteriormente.

3.3.4 Os parâmetros de simulação

É necessário que se apresente os parâmetros utilizados na simulação e como eles foram implementados no OpenFOAM, no interior do diretório *system*, na pasta dos casos em que constam os arquivos *controlDict*, *fvSchemes* e *fvSolution*, que serão analisados. No primeiro, o usuário configura o controle do passo de tempo, do número de Courant e do tempo total de simulação, por exemplo; já no segundo, pode escolher os métodos de discretização de volumes finitos a serem adotados; e, no terceiro, especifica os métodos de solução para os sistemas lineares e critérios de convergência (GUIMARÃES, 2014).

Corroborando o exposto no delineamento do problema deste trabalho, o arquivo *controlDict* foi configurado para iniciar no tempo zero, simular 1.800 segundos, o equivalente a 30 minutos, com um *time-step* inicial de $1\text{e-}5$, ou seja, $0,00001$

segundo por passo, utilizando o ajuste adaptativo do *time-step*, com base no número de Courant, e com a escrita de resultado a cada segundo.

Quanto ao arquivo *fvSchemes*, adotou-se os esquemas numéricos de acordo com o que mostra o código representado na figura 40.

Figura 40 - Configuração dos esquemas no OpenFOAM

```

15 // * * * * *
16
17 ddtSchemes
18 {
19     default Euler;
20 }
21
22 gradSchemes
23 {
24     default Gauss linear;
25 }
26
27 divSchemes
28 {
29     div(rhoPhi,U) Gauss upwind;
30     div(phi,alpha) Gauss interfaceCompression vanLeer 1;
31     div(((rho*nuEff)*dev2(T(grad(U)))) Gauss linear;
32 }
33
34 laplacianSchemes
35 {
36     default Gauss linear corrected;
37 }
38
39 interpolationSchemes
40 {
41     default linear;
42 }
43
44 snGradSchemes
45 {
46     default corrected;
47 }

```

Fonte: Autoria própria (2022)

Nesse contexto, o termo “Gauss” especifica a discretização padrão dos volumes finitos por integração gaussiana, definindo, na sequência, o esquema de interpolação a ser utilizado, que, neste caso, é o Gauss linear. Segundo Guimarães (2014, p. 50), “no termo laplaciano, o Gauss requer, além de um método de interpolação, um esquema de gradiente normal à superfície, que, no caso é o *corrected*”; no termo temporal, por sua vez, discretizado por Euler, é tido como de primeira ordem, implícito e limitado.

Os critérios de convergência foram definidos conforme o código da figura 41, assim como os métodos de solução dos sistemas. O método PIMPLE, ou PISO-

SIMPLE, aparece como alternativa ao método SIMPLE para as simulações de fluxo em regime transiente.

Figura 41 - Métodos de solução e critérios

```

19  alpha.water
20  {
21      nAlphaCorr      1;
22      nAlphaSubCycles 2;
23  }
24
25  "pcorr.*"
26  {
27      solver          PCG;
28      preconditioner  DIC;
29      tolerance       1e-10;
30      relTol          0;
31  }
32
33  p_rgh
34  {
35      solver          PCG;
36      preconditioner  DIC;
37      tolerance       1e-07;
38      relTol          0.05;
39  }
40
41  p_rghFinal
42  {
43      $p_rgh;
44      tolerance       1e-07;
45      relTol          0;
46  }
47
48  U
49  {
50      solver          smoothSolver;
51      smoother        symGaussSeidel;
52      tolerance       1e-06;
53      relTol          0;
54  }
55 }
56
57 PIMPLE
58 {
59     momentumPredictor no;
60     nCorrectors      3;
61     nNonOrthogonalCorrectors 0;
62 }

```

Fonte: Autoria própria (2022)

Com o objetivo de otimizar o processamento, amenizando quaisquer possíveis problemas referentes ao custo computacional e ao tempo de cálculo, utilizou-se de uma técnica praticada em simulações realizadas no OpenFOAM. O código *decomposePar*, associado ao arquivo *decomposeParDict* armazenado no diretório *system*, divide a geometria em quatro partes, para que cada núcleo do computador trabalhe uma parcela dos processos paralelamente.

Para consolidar as partes calculadas separadamente, utiliza-se o código *reconstructPar* que, depois do processamento dos cálculos, permite que o terminal realize o processo de reconstrução da malha e da geometria para que, só então, os resultados estejam disponíveis para apreciação. Apesar de diminuir consideravelmente o tempo de processamento da simulação, a técnica gera cinco vezes mais diretórios de tempo, uma vez que cada processador gera um arquivo, e a reconstrução do modelo gera outro conjunto de diretórios. Dessa forma, há uma demanda maior da capacidade do disco rígido, o que pode expressar relevante desvantagem em relação ao custo de armazenamento.

Tendo em vista que o objetivo da migração para o OpenFOAM era, justamente, a redução de custo de processamento, contornou-se o problema de armazenamento por meio da utilização de um HD externo com capacidade de 1 TB, com 700 GB livres e disponíveis para alocação por parte da máquina virtual e dos arquivos gerados pela simulação.

3.3.5 Calibração do Modelo

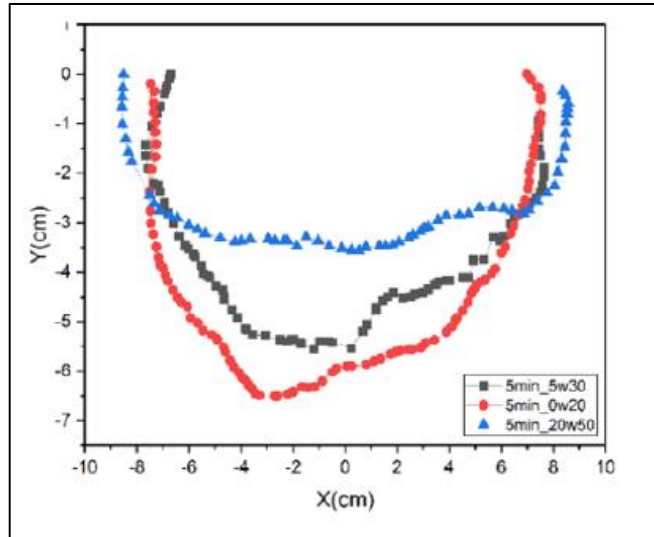
Antes de aplicar as variações necessárias ao cumprimento do objetivo do presente trabalho, fez-se necessário executar a etapa de calibração do modelo, a fim de aperfeiçoar a representação da realidade físico-química com avaliação dos parâmetros inerentes ao modelo matemático. Vale ressaltar que a calibração do modelo proposto configura um eficiente processo de ajuste paramétrico, bem como avaliação do impacto destes parâmetros na resposta física do modelo matemático, quando em comparação com os dados estimados em laboratório (KONDAGESKI; FERNANDES, 2009).

Assim, tendo fixado o tipo de óleo (5W-30) e o tempo de análise (300 segundos), o processo de calibração objetivou estimar os valores dos parâmetros D e F apresentados no item 2.9 por meio da comparação das respostas de perfil de contaminação obtidas na simulação com o observado em laboratório por Dória (2022). Essa etapa é de fundamental importância para que se tenha confiabilidade representativa do modelo construído, quando conflitado com o caso real.

Para calibrar o modelo, isto é, parametrizar os arquivos a serem trabalhados pelo OpenFOAM, foram realizados diversos testes com a variação dos termos de Darcy e Forchheimer. O objetivo foi simular o caso de fluxo, no qual se injetou o

lubrificante 5W-30, com viscosidade a de 77,23 cSt 25° C e densidade de 852 kg/m³ durante um tempo de 5 minutos (300 segundos), de modo a se obter o resultado representado pela linha cinza da figura 48.

Figura 48 - Gráfico o avanço axial do lubrificante em vista frontal



Fonte: Dória (2022)

Neste caso, a areia empacotada no modelo de bancada trabalhado por Dória (2022) foi coletada na Praia do Saco, em Marechal Deodoro, e apresentava diâmetro médio de Sauter estimado de 3,06 μm . No gráfico da figura 48, o comportamento fluidodinâmico do óleo no leito de areia, obtido em laboratório, resultou em um perfil de contaminação parabólico atingindo, em 5 minutos de fluxo, a profundidade de aproximadamente 5,5 cm e um espalhamento radial máximo (vide região superior da parábola) de aproximadamente 8 cm de raio.

Inicialmente, partiu-se de um valor padrão para D, definido pelo OpenFOAM como responsável por um comportamento de derramamento em leito poroso, conforme mostra o trecho comentado do código do arquivo *fvmmodels* para o modelo Darcy-Forchheimer.

Figura 49 - Recorte de tela do arquivo *fvmmodels* do diretório *constant*

```

explicitPorositySourceCoeffs
{
    selectionMode    cellZone;
    cellZone        porousBlockage;

    type            DarcyForchheimer;

    // D 100; // Very little blockage
    // D 200; // Some blockage but steady flow
    // D 500; // Slight waviness in the far wake
    // D 1e10; // Fully shedding behavior

```

Fonte: Autoria própria (2022)

Vale ressaltar que, nessa configuração, considerou-se que a distribuição das características permoporosas do meio se dá isotopicamente nas direções x, y e z, ou seja, não há variação na forma de estrutura porosa entre as diferentes direções do domínio. Além disso, considerou-se inicialmente apenas a influência do fator D, assumindo-se um comportamento plenamente darciano para o escoamento, o que quer dizer que a queda de pressão se dá de forma linear e não considera os fatores inerciais (MACIEL, 2015).

Dessa forma, o modelo inicial, chamado de “Caso-0” ficou definido pelo conjunto de características destacado na tabela 2, onde Dxz são os valores adotados para D na direção x e na direção z, Fxz analogamente, Dy e Fy os valores adotados para D e F na direção y.

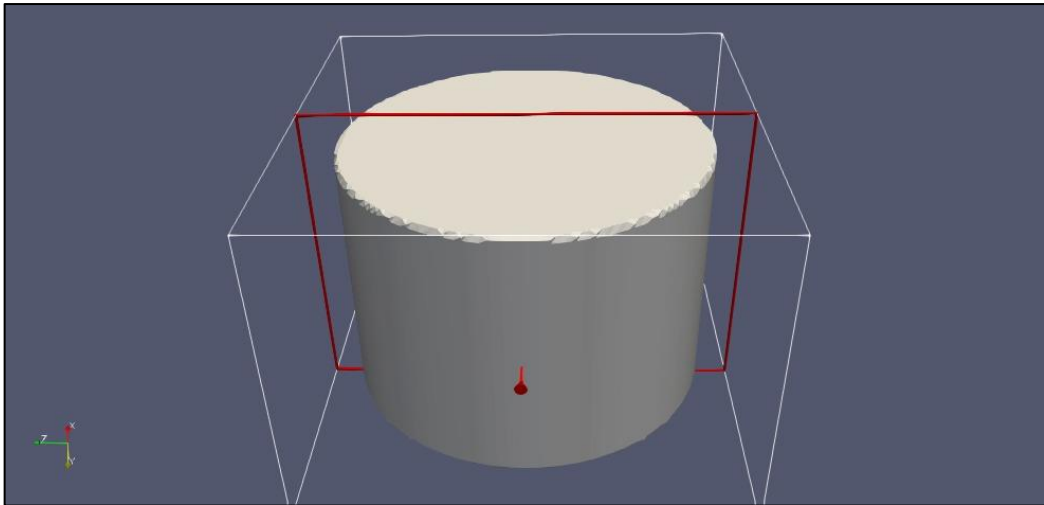
Tabela 2 - Conjunto de características do Caso-0

Dxz	Dy	Fxz	Fy
1E+10	1E+10	0	0

Fonte: Autoria própria (2022)

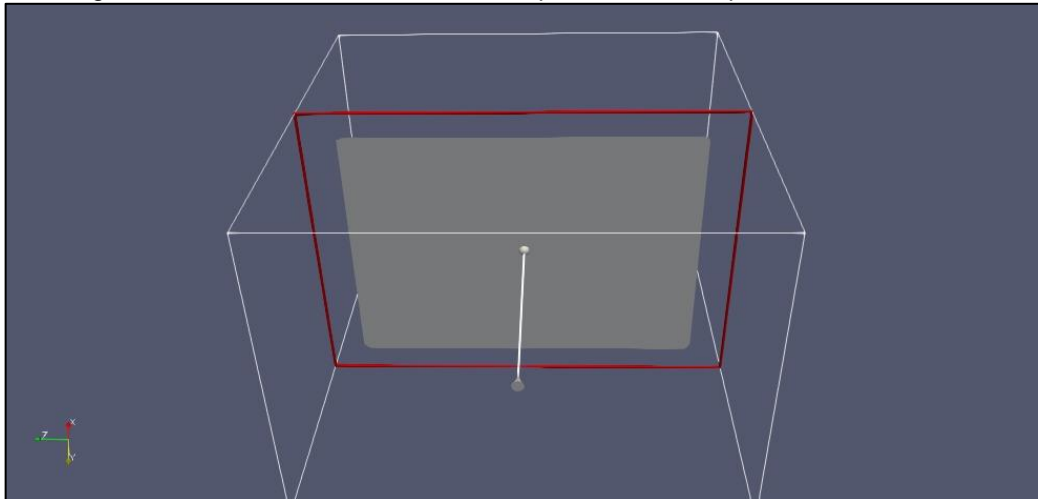
A forma utilizada para avaliação do perfil de contaminação através do software ParaView, consistiu no fatiamento transversal à geometria do cilindro, passando pelo seu centro, como mostra as figuras 50 e 51.

Figura 50 - Fatiamento do cilindro para análise do perfil de escoamento



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 51 - Fatia transversal do cilindro para análise do perfil de escoamento



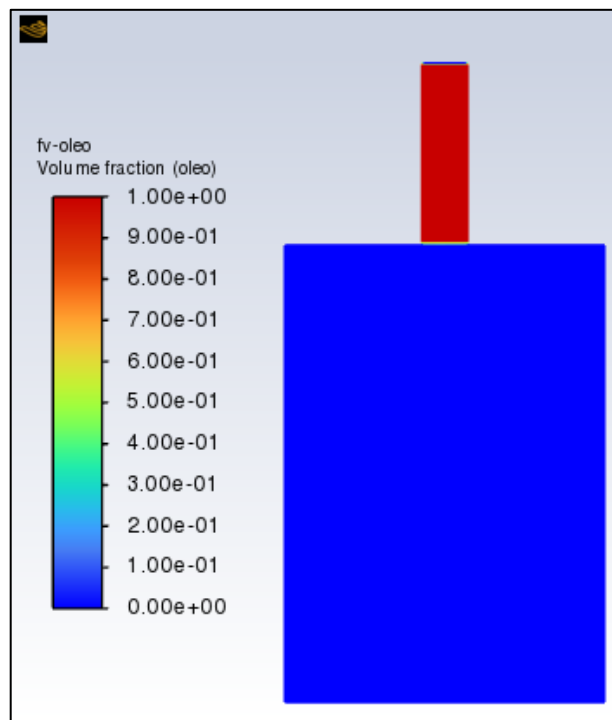
Fonte: Autoria própria (2022)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Modelo *Fluent*

Com o objetivo de avaliar o sucesso das etapas de empacotamento das regiões do modelo, plotou-se as condições iniciais da fração volumétrica, conceito introduzido pela abordagem euleriana, como foi discutido no item 2.7.1, referente a cada fase física presente no problema, o óleo, a areia e o ar, que estão representadas respectivamente nas figuras 42, 43 e 44.

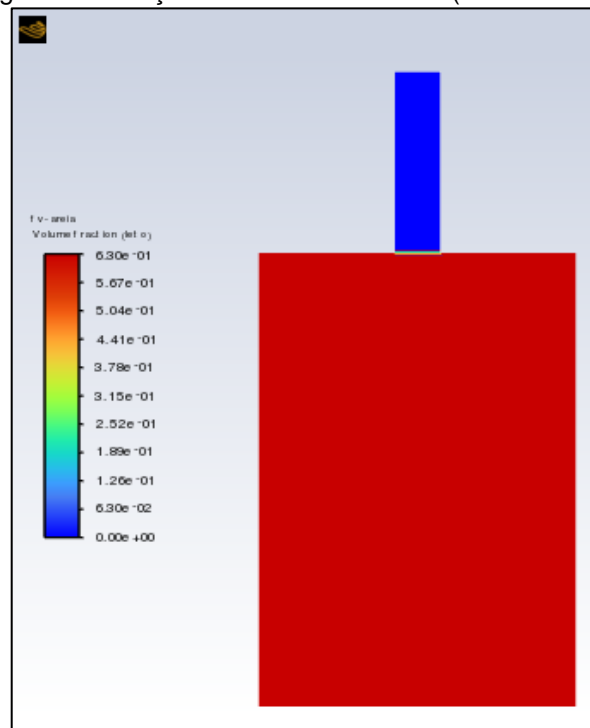
Figura 42 - Fração volumétrica do óleo (5W-30)



Fonte: Autoria própria (2022)

Conforme discutido nos delineamentos físicos do problema no item 3.1.4, o óleo, a princípio, estava acondicionado na pipeta, para que, ao início do processamento, pudesse escoar por sobre o leito arenoso. Na figura 42, a escala à esquerda descreve que a fração volumétrica do óleo no tempo inicial é de 0.00 na região retangular maior, representação do meio poroso, e de 1 no interior da região retangular menor, representação da pipeta.

Figura 43 - Fração volumétrica da areia (Praia do Saco)

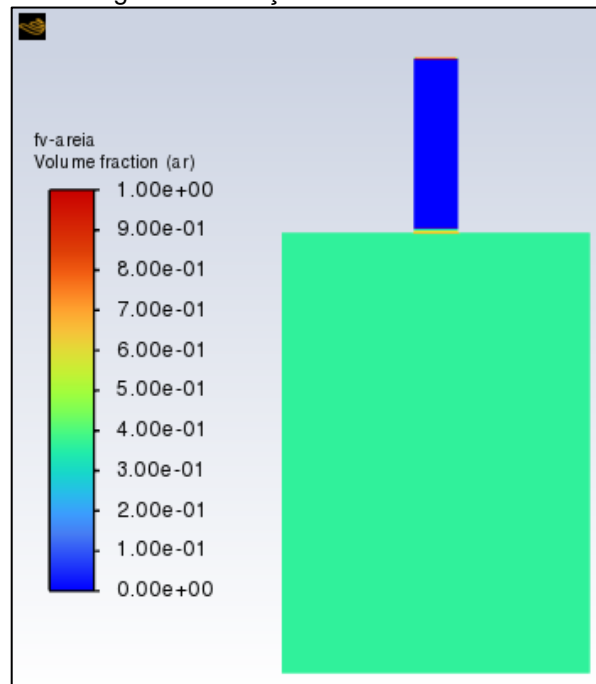


Fonte: Autoria própria (2022)

Analogamente, a figura 43 apresenta a fração volumétrica (doravante FV) da areia, neste caso, implementada com as características da Praia do Saco, cujo diâmetro médio de Sauter é $3,06 \mu\text{m}$. A escala de cores indica que toda a porção de areia presente no sistema está concentrada no retângulo maior a uma FV de 0,63, enquanto o retângulo menor apresenta FV nula. Nota-se que, diferentemente do observado na figura 42, o topo de escala da FV de areia no sistema é de 0,63, demonstrando coerência no processo de condicionamento do limite de empacotamento da fase granular arenosa, bem como do empacotamento da região porosa.

De maneira lógica, é possível admitir que o equivalente a 0,37 “faltante” na FV da região do retângulo maior estaria ligada à porosidade de 37% definida para este caso da modelagem, o que se confirma na figura 44. Observa-se, por meio da escala de cores e da representação gráfica do modelo, que o ar preenche uma FV de 0,37 na região de leito arenoso, cumprindo, assim, com as configurações padrão do *Fluent* em relação à alocação automática do ar na região porosa de um meio.

Figura 44 - Fração volumétrica do ar



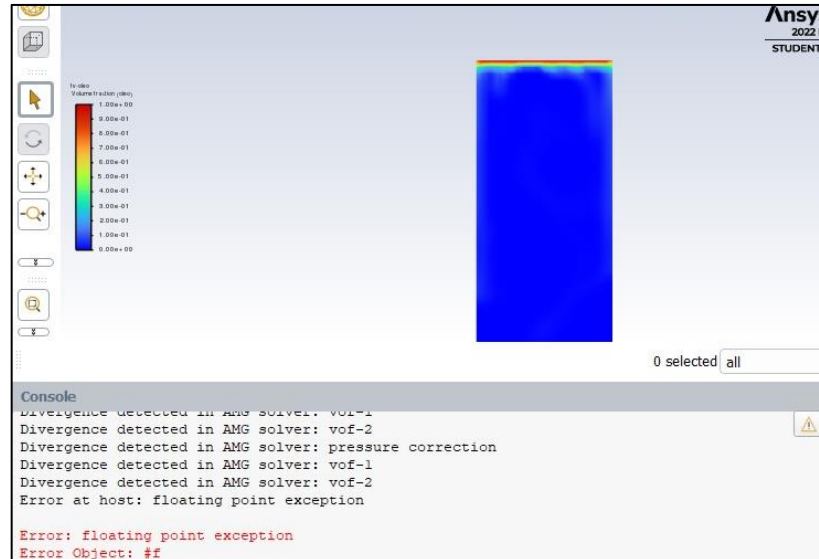
Fonte: Autoria própria (2022)

Uma vez iniciado o processamento da solução para o modelo construído no item 3.2, acompanhou-se os gráficos de residuais para verificação da convergência da solução, bem como o gradual ajuste do *time-step*, com o objetivo de acelerar o andamento da simulação, à medida que os erros residuais diminuía. A partir disso, foi possível perceber um problema na realização do processamento do modelo, visto que não era possível aumentar, mesmo de forma gradativa, o valor do *time-step*. Assim, também não era possível adaptar o tamanho de cada passo de cálculo realizado pelo processamento, pois os residuais não diminuía com o avançar da simulação. Forçado o aumento do tamanho do passo, o modelo passava a não atender os critérios de convergência, aumentando a dimensão dos residuais e tornando a solução não convergente.

Em esforço contínuo para se obter um resultado sólido, realizou-se uma tentativa de simulação com duração de três dias, com 72 horas ininterruptas de processamento. Durante a maior parte do processo, os valores de erros residuais foram acompanhados, e o *time-step* foi levemente ajustado à medida que o modelo convergia. Como resultado, o software foi capaz de processar apenas 2,1 segundos de fluxo, demonstrando que o modelo não estava bem ajustado e requeria certas alterações para a solução da dificuldade encontrada, resultando em erro de *floating point exception*, que, segundo Hauser (1996), está associado à impossibilidade de

cálculo como, por exemplo, divisão por zero (Figura 45).

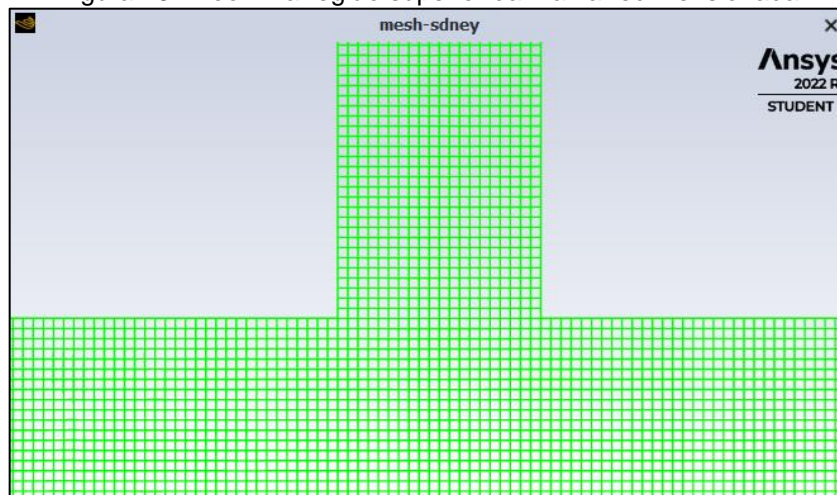
Figura 45 - Erro de *floating point exception*



Fonte: Aatoria própria (2022)

Diversas variações e simplificações foram realizadas na tentativa de superação dos obstáculos emergidos, como o refinamento da malha para fim de ganho na convergência e a diminuição dos residuais, uma vez que, de acordo com Baker (2005), embora seja contraintuitivo, um maior refinamento da malha, quando na medida certa, pode otimizar o tempo gasto nas etapas de processamento por meio do ganho na velocidade da convergência nos cálculos da solução do modelo. A figura 46 mostra em zoom a malha redesenhada com o tamanho do elemento equivalente a $1e-6$ metro, ou seja, $1 \mu\text{m}$. O referido redimensionamento da malha resultou em 29.600 células.

Figura 46 - Zoom na região superior da malha redimensionada



Fonte: Aatoria própria (2022)

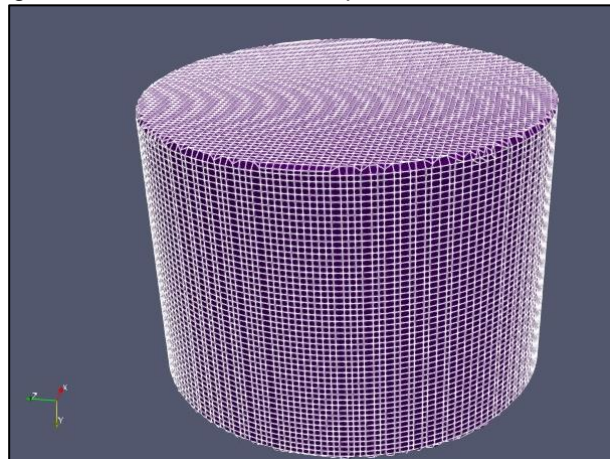
Todavia, as tentativas realizadas não foram exitosas, e o modelo continuou apresentando elevado custo computacional diante dos recursos disponíveis. Desse modo, pensou-se uma maneira alternativa de implementar o modelo para a obtenção de resultados possíveis de discussão, coerente com o planejamento realizado e compatível com o experimento realizado por Dória (2022), supracitado no item 3.3.

4.2 Modelo OpenFOAM

4.2.1 A malha

A malha resultante da importação da geometria desenvolvida no Onshape e configurada através do arquivo *blockMeshDict* é exibida com o auxílio do ParaView e foi composta por 193.212 elementos com 199.419 nós (Figura 47).

Figura 47 - Malha resultante apresentada no ParaView



Fonte: Autoria própria (2022)

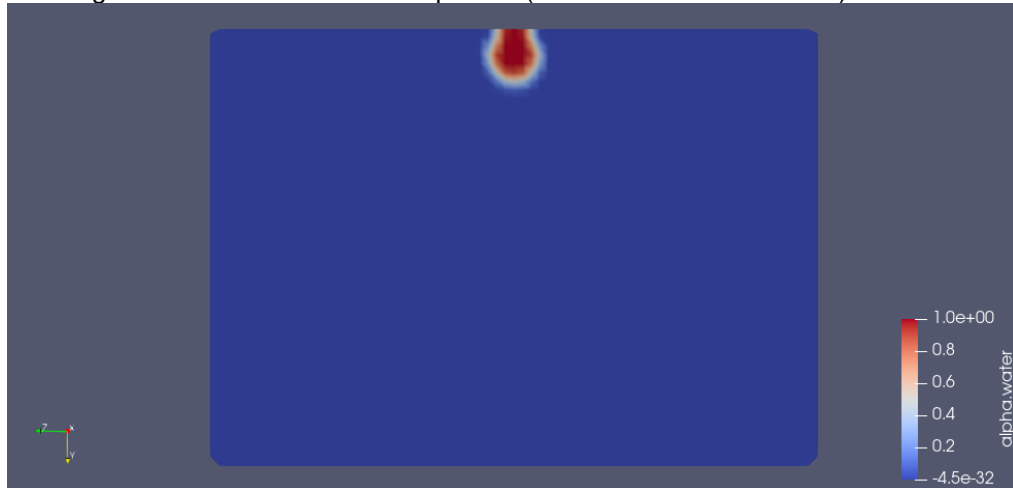
4.2.2 Calibração do modelo

Os casos simulados nesta etapa, tiveram o tempo médio de processamento entre 2 horas e 2,5 horas, com exceção dos casos 3 e 9.

No Caso-0, pôde-se perceber um escoamento pouco expressivo, haja visto que a concentração de óleo, após 300 segundos de fluxo, se limitou-se à parte mais superior do leito arenoso, anunciando que houve pouco escoamento e, conseqüentemente, baixíssimos resultados para a o avanço axial do óleo ne, como seu espalhamento radial. A figura 52 representa o corte transversal na geometria do

cilindro passando pelo seu centro, e destaca em escala de cores a fração volumétrica do óleo no tempo equivalente a 300 segundos de simulação.

Figura 52 - FV de óleo no leito poroso (vista frontal do fatiamento) - Caso-0



Fonte: Autoria própria (2022)

Apreciando a resposta obtida do Caso-0, nota-se uma tendência de comportamento fluidodinâmico minimamente coerente com os resultados observados em laboratório por Dória (2022) em termos qualitativos. Há no perfil de escoamento resultante da simulação o desenvolvimento de um comportamento parabólico muito embora os resultados quantitativos estejam muito aquém do esperado. Além disso, praticamente não se nota vantagem do avanço radial sobre o avanço axial, em termos de suas dimensões.

Pensando nisso, adotou-se para o Caso-1 a consideração de distribuição anisotrópica das características permoporosas de modo que estas variam da direção y para as direções x e z . Assim sendo, aumentou-se o valor de D_y , a fim de incrementar a resistência viscosa ao fluxo na direção y (MACIEL, 2015). O conjunto de características associadas ao Caso-1 estão expostas na tabela 3.

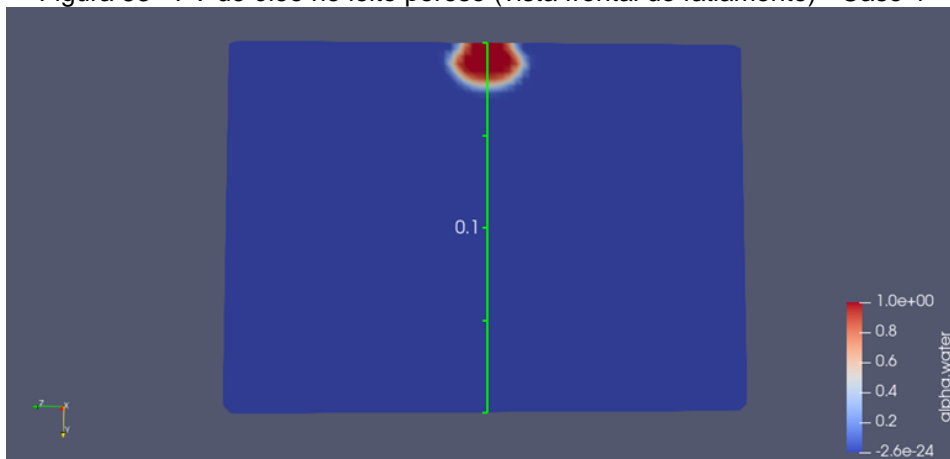
Tabela 3 - Conjunto de características do Caso-1

D_{xz}	D_y	F_{xz}	F_y
$1E+10$	$3E+10$	0	0

Fonte: Autoria própria (2022)

Como resultado, obteve-se o perfil apresentado na figura 53, que mostra a resposta comportamental à alteração realizada em D_y , ou seja, com o aumento da resistência viscosa ao fluxo na direção y , o perfil apresentou um ganho no espalhamento radial do óleo e um encolhimento no alcance axial em y . De acordo com a régua adicionada à extensão do cilindro, o escoamento continua limitado à porção superior do leito, não atingindo a marca dos 2,5 centímetros de avanço.

Figura 53 - FV de óleo no leito poroso (vista frontal do fatiamento) - Caso-1



Fonte: Autoria própria (2022)

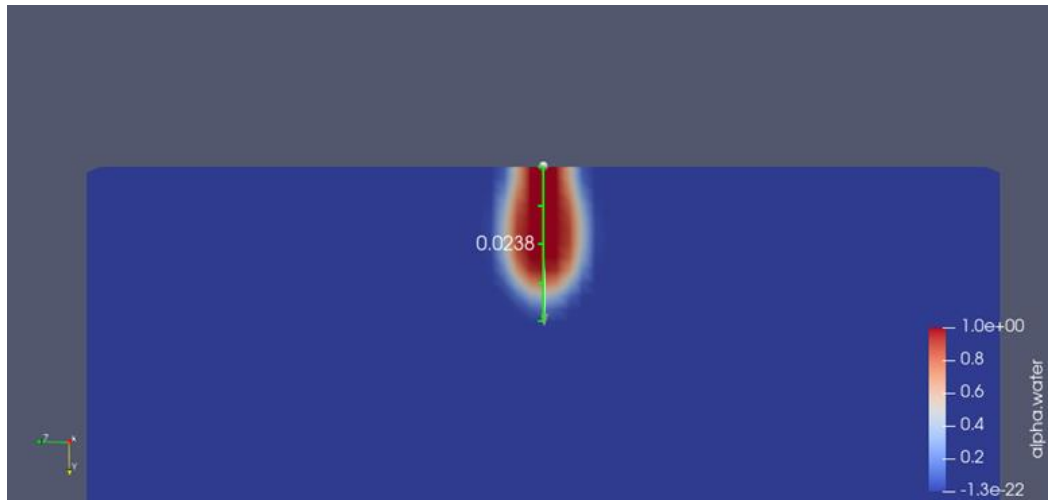
Com a finalidade de potencializar o avanço no escoamento, diminuiu-se os coeficientes D em 10 vezes, nas 3 dimensões de fluxo, mantendo-se a proporcionalidade antes estabelecida. Então, foram implementados D e F segundo a tabela 4.

Tabela 4 - Conjunto de características do Caso-2

D_{xz}	D_y	F_{xz}	F_y
1E+9	3E+9	0	0

Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 54 - FV de óleo no leito poroso (zoom em vista frontal do fatiamento) - Caso-2



Fonte: A autoria própria (2022)

A figura 54 implementa a régua aplicada à medição do avanço axial do óleo na direção vertical e mostra que as alterações realizadas nos coeficientes D_{xz} e D_y resultaram numa menor resistência ao fluxo, conseqüentemente num aumento das dimensões do espalhamento do agente contaminante sobre o meio contaminado. Notou-se também a manutenção da tendência de formação de um perfil parabólico.

No Caso-3, os valores de D em x , y e z foram reduzidos de forma exacerbada, resultando num tempo de processamento muito maior que os demais casos (aproximadamente 24 horas), um erro fatal ao fim do tempo de processamento e um conseqüente *crash* no sistema resultando em diretórios de tempo corrompidos e impossibilidade de apreciação dos seus resultados. Os valores de D foram, a partir desse ponto manipulados com maior cautela.

Em seguida, visando dar mais liberdade ao escoamento nas 3 direções de fluxo em comparação com o Caso-2, e na tentativa de se obter um perfil com maiores dimensões em seu espalhamento radial, diminuiu-se os valores de D_{xz} e D_y de acordo como mostra a tabela 5.

Tabela 5 - Conjunto de características do Caso-4

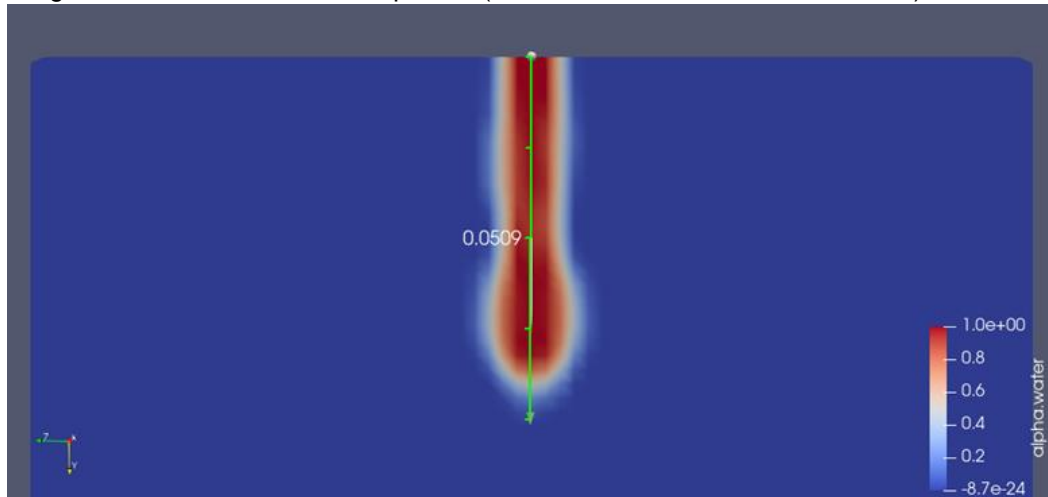
D_{xz}	D_y	F_{xz}	F_y
3E+8	8E+8	0	0

Fonte: A autoria própria (2022)

O perfil obtido do Caso-4 está apresentado na figura 55 e reflete as manipulações realizadas em D . Pode-se perceber um ganho considerável no avanço axial do óleo na direção vertical, por outro lado, desfaz-se o perfil parabólico

anteriormente observado nos demais casos. Isso se deu pois, com a redução drástica da resistência viscosa ao escoamento, o fluxo tornou-se mais facilitado na direção da gravidade. Em termos quantitativos, o Caso-4, entre todos os casos apresentados até aqui, aproximou-se mais ao resultado de Dória (2022) (Figura 48) levando-se em consideração apenas o avanço axial.

Figura 55 - FV de óleo no leito poroso (zoom em vista frontal do fatiamento) - Caso-4



Fonte: Autoria própria (2022)

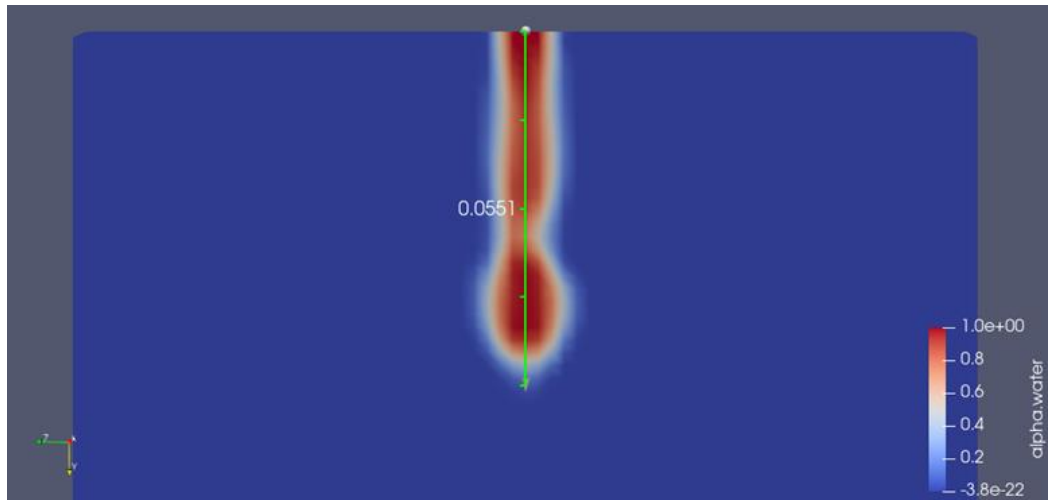
No Caso-5 as dimensões de D foram manipuladas de modo a diminuir ainda mais a resistência ao escoamento nas direções de fluxo x e z, na tentativa de facilitar preponderantemente o espalhamento do óleo nessas direções. Já Dy foi também reduzida, mas numa proporção bem menor, de modo que o este caso se constituiu como indica a tabela 6.

Tabela 6 - Conjunto de características do Caso-5

Dxz	Dy	Fxz	Fy
3E+8	8E+8	0	0

Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 56 - FV de óleo no leito poroso (zoom em vista frontal do fatiamento) - Caso-5



Fonte: Autoria própria (2022)

Em comparação com o Caso-4, o Caso-5 esboçou pouca alteração em seu comportamento fluidodinâmico em termos do perfil obtido, bem como das dimensões de avanço radial e axial. Notou-se apenas uma maior dissipação do óleo.

Tendo em vista a correlação estabelecida na equação 9 (item 2.9), podemos expressar o termo S_i como ∇p , sendo a queda de pressão por unidade de comprimento, resultando na equação 13. Conhecendo a queda de pressão dependente da velocidade, temos uma função polinomial descrita na equação 14 (OPENFOAM, 2012).

$$\nabla p = -(\mu D + \frac{1}{2}\rho|u_{jj}|F)u_i \quad (13)$$

$$\nabla p = \frac{\Delta p}{\Delta x} = Au + Bu^2 \quad (14)$$

Comparando as equações, tem-se:

$$A = \mu D \text{ e } B = \frac{1}{2}\rho F \quad (15)$$

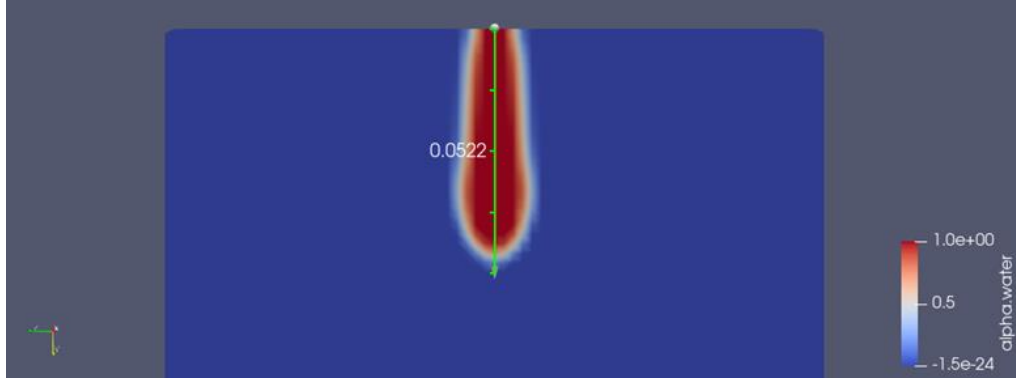
Considerando, portanto, a influência da resistência inercial F na perda de pressão, constituiu-se o Caso-6 anulando o coeficiente D e implementando F de forma inicialmente isotrópica, como mostra a tabela 7.

Tabela 7 - Conjunto de características do Caso-6

Dxz	Dy	Fxz	Fy
0	0	1E+9	1E+9

Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 57 - FV de óleo no leito poroso (zoom em vista frontal do fatiamento) - Caso-6



Fonte: Autoria própria (2022)

Analisando as equações 13 e 15, percebe-se que o termo F intensifica a influência da massa específica do fluido no cômputo da queda de pressão no meio poroso além de estar associado à parte quadrática da velocidade do polinômio da equação 14. Assim, explica-se a influência do termo F , que mesmo implementado isotopicamente, permite maior fluxo na direção da gravidade (AMIRI, 2019).

Com isso, a fim de se obter a configuração desejada em termos do espalhamento do óleo na direção radial, bem como do avanço do óleo na direção axial, foram realizados no total mais de 20 combinações dos fatores D e F nas direções x - z e y , para alcançar assim a calibração do modelo.

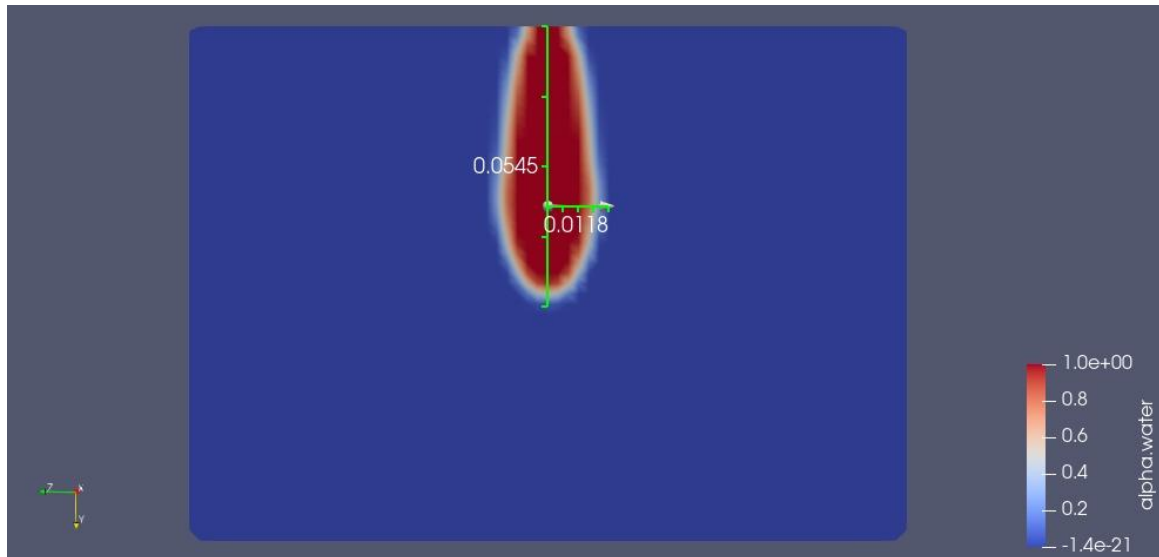
Dentre os casos simulados, um deles obteve melhor desempenho com relação às dimensões de espalhamento radial e axial do óleo sendo este o Caso-19, cuja configuração está disposta na tabela 8. O resultado obtido está apresentado na figura 58 e refletiu um avanço axial de 5,45 cm e espalhamento radial de 1,18 cm.

Tabela 8 - Conjunto de características do Caso-19

Dxz	Dy	Fxz	Fy
1E+7	2E+8	1E+10	1E+9

Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 58 - FV de óleo no leito poroso (zoom em vista frontal do fatiamento) - Caso-19



Fonte: Autoria própria (2022)

O avanço de óleo na direção y foi satisfatório se comparado com o modelo obtido por Dória (2022), mas ainda assim o espalhamento radial alcançado não se desenvolveu o suficiente. Com isso, não foi possível assumir o modelo como calibrado, uma vez que, dadas as mais variadas configurações dos parâmetros D e F , não se obteve resposta satisfatória em termos do perfil de contaminação, principalmente quanto à sua dimensão radial. Uma vez que não se teve, por parte da observação laboratorial, a forma como se distribuiu a pressão no modelo de bancada de Dória (2022), ficou-se com um universo de combinações possíveis dos fatores de D e F que se correlacionam entre si na equação de Darcy-Forchheimer dificultando o acerto na parametrização dos dois termos.

A tabela 9, lista os principais casos simulados no que diz respeito às suas respostas quanto ao raio de espalhamento e profundidade do avanço.

Tabela 9 - Lista de resultados das tentativas de calibração do modelo

Modelo	Profundidade (cm)	Raio (cm)
Caso-0	1,10	0,50
Caso-1	2,25	0,80
Caso-2	2,28	0,80
Caso-4	5,09	0,85
Caso-5	5,51	0,85
Caso-6	5,22	0,85
Caso-13	4,61	0,87
Caso-14	4,67	1,10

Caso-16	4,71	1,20
Caso-19	5,45	1,17

Fonte: Autoria própria (2022)

4.2.3 Influência das propriedades do óleo no escoamento

Considerando o Caso-19 citado no item 4.2.2 como sendo, dentre todos os outros casos estudados, o mais coerente em termos do comportamento fluidodinâmico do modelo matemático, buscou-se avaliar a influência das propriedades do óleo sobre o perfil de contaminação sobre o leito de areia modelado por este caso.

Vale ressaltar que o Caso-10 foi implementado com as propriedades físicas do óleo lubrificante 5W-30, listadas na tabela 10:

Tabela 10 - Propriedades do óleo 5W-30

Óleo	ρ (kg/m³)	μ (m²/s)
5W30	852	7,723E-05

Fonte: Autoria própria (2022)

Os resultados referentes ao derramamento do óleo 5W-20 podem ser conferidos na figura 56. Avaliando, então, a percolação do óleo lubrificante 0W-20 descrito na tabela 11.

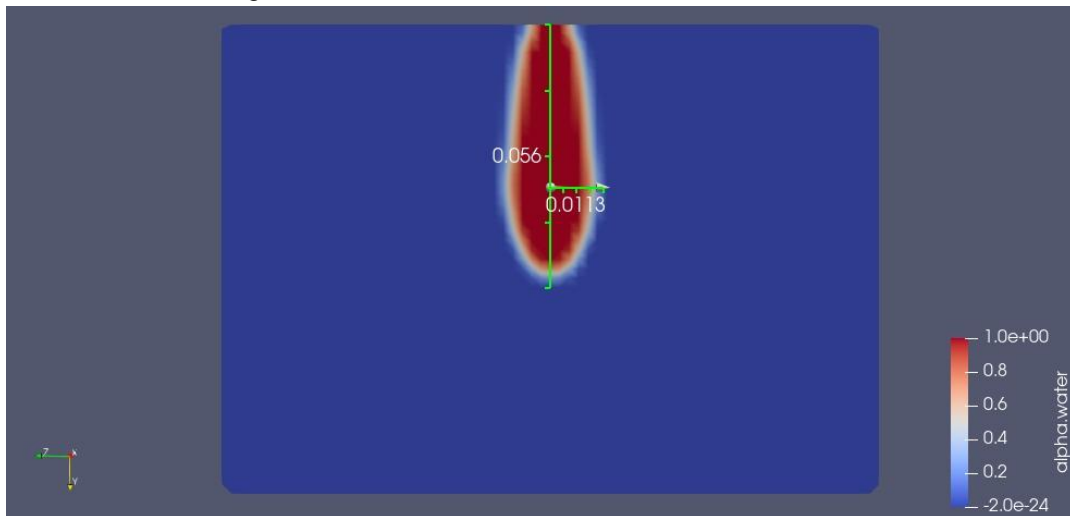
Tabela 11 - Propriedades do óleo 0W-20

Óleo	ρ (kg/m³)	μ (m²/s)
0W-20	850,5	5,731E-05

Fonte: Autoria própria (2022)

O perfil obtido pela simulação do óleo lubrificante no modelo gerado pelo Caso-19 é exibido na figura 59.

Figura 59 - FV do lubrificante 0W-20 em leito arenoso



Fonte: A autoria própria (2022)

Em comparação com o resultado alcançado pelo óleo lubrificante 5W-30, este (0W-20) se sobressaiu ao outro a respeito do avanço axial. Isso se deve ao fato de que por possuir menor viscosidade, sofre menos influência da resistência representada pelo termo D na equação de Darcy-Forchheimer. Por outro lado, esse ensaio mostra um menor espalhamento do óleo na direção radial.

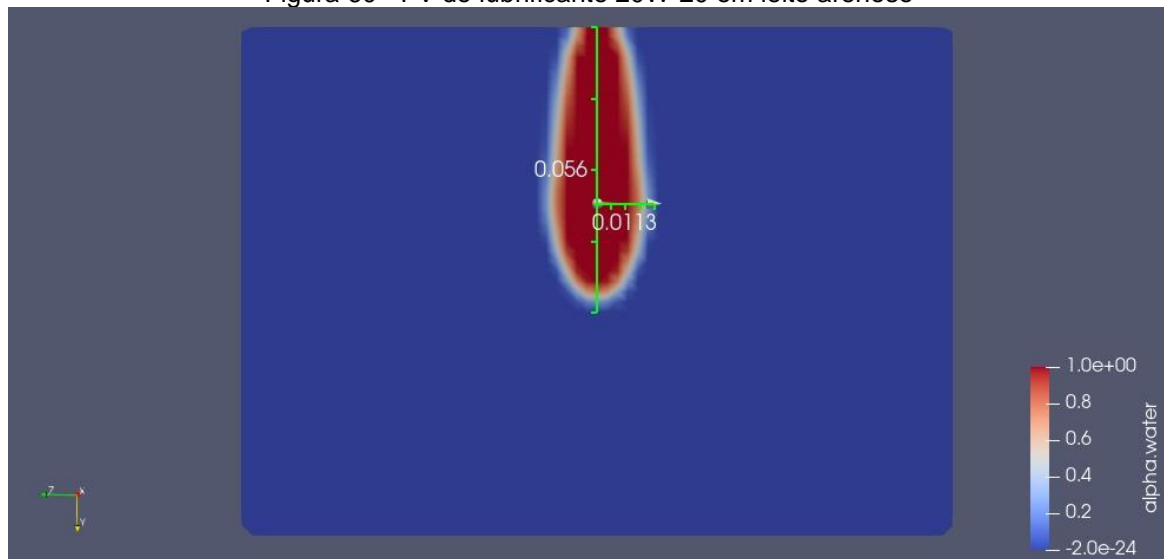
Implementando as propriedades do óleo lubrificante 20-W50 (tabela 12), ligeiramente mais pesado e consideravelmente mais viscoso que os outros dois tipos de óleo, a simulação mostrou uma redução notável no avanço axial e um ligeiro incremento no raio de espalhamento. Isso confirma mais uma vez o impacto que a viscosidade do fluido possui sobre o comportamento fluidodinâmico em meios arenosos, como mostra a figura 60.

Tabela 12 - Propriedades do óleo 20W-50

Óleo	ρ (kg/m ³)	μ (m ² /s)
0W-20	850,5	5,731E-05

Fonte: A autoria própria (2022)

Figura 60 - FV do lubrificante 20W-20 em leito arenoso



Fonte: Autoria própria (2022)

Os comportamentos fluidodinâmicos obtidos com a variação das propriedades do óleo estão coerentes com a literatura e refletem qualitativamente os resultados observados por Dória (2022) em seus modelos de bancada. O Modelo de Darcy-Forchheimer utilizado pelo OpenFOAM como método para discretização de meios porosos carregam consigo a prova de que o fenômeno de escoamento de óleo em leito arenoso depende não somente da velocidade de fluxo, mas a queda de pressão ao longo do comprimento da geometria modelada está diretamente relacionada às propriedades do fluido e das características permoporosas do meio (HAFSTEINSSON, 2009). A tabela 13 lista os tipos de óleo e suas respostas quanto ao comportamento fluidodinâmico em termos dos avanços radial e axial.

Tabela 13 - Resultados da variação das propriedades do óleo

Óleo	Profundidade (cm)	Raio (cm)
0W-20	5,6	1,13
5W-30	5,45	1,17
20W-50	5,05	1,2

Fonte: Autoria própria (2022)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Levando em consideração os potenciais riscos ambientais que detém o petróleo e as atividades que envolvem sua extração, transporte, tratamento, armazenamento e consumo, deve-se haver cada vez mais incentivo para o desenvolvimento de estudos e técnicas que venham a prever, evitar, mitigar ou remediar esses riscos. Assim, o presente trabalho é um ensaio para um estudo muito mais completo acerca de como o petróleo e seus derivados interagem com a natureza e o meio ambiente quando colocados em contato direto.

A análise do escoamento de petróleo e seus derivados em leito de areia é um pequeno recorte de um tema muito mais abrangente que é o petróleo e as questões ambientais. Tema esse que deve ser sempre discutido, não só dentro dos ambientes acadêmicos como também por parte dos profissionais dessa indústria globalizada e até mesmo da sociedade como um todo.

Aqui, pôde-se discutir um pouco os fenômenos que descrevem a percolação de óleo em leito poroso não consolidado e realizar uma breve e instigante análise do comportamento que essa percolação incorpora quando variadas algumas condições e parâmetros intrínsecos aos elementos nela envolvidas. Partindo do pontapé inicial dado por Tatiana Dória em sua dissertação de mestrado, essa pesquisa buscou desenvolver modelos matemáticos através da fluidodinâmica computacional que pudessem caracterizar e quantificar os fenômenos físicos observados nos casos de desastres ambientais, não somente de vazamento de óleo na praia, mas de uma maneira geral.

A fluidodinâmica computacional – CFD é um ramo da ciência que tem crescido exponencialmente com o avanço da tecnologia e da capacidade de processamento dos computadores de última geração. Assim, cabe aos pesquisadores e profissionais das engenharias empregarem as técnicas desenvolvidas por esse nicho científico em prol da conservação do meio ambiente e da sustentabilidade na cadeia produtiva desse commodity tão importante para sociedade, enquanto gerador de energia e/ou matéria prima para diversos bens de consumo.

Apesar do insucesso na tentativa de modelagem do problema físico de escoamento no ANSYS Fluent, bem como a dificuldade enfrentada no processo de calibração do modelo construído no OpenFOAM ao longo do trabalho, foi possível constatar o impacto das características físico-químicas dos diferentes tipos de óleo e

das características permoporosas dos leitos de areia sobre comportamento fluidodinâmico do escoamento estudado e sobre o perfil de contaminação resultante desse comportamento.

Verificou-se nos ensaios realizados, que a viscosidade do óleo interfere diretamente no quantitativo dos avanços radial e axial sobre um mesmo meio poroso, de sorte que os resultados obtidos acompanharam as observações feitas no trabalho realizado em laboratório: quanto mais viscoso o óleo, menor será seu espalhamento axial vertical e maior será o seu avanço nas direções radiais. Analogamente, quanto menos viscoso é o óleo, mais desenvolvido será o seu avanço axial vertical e menos desenvolvido o espalhamento radial.

Quanto às características permoporosas do meio, pôde-se confirmar que as resistências viscosas e inerciais, descritas nas correlações de Darcy e Forchheimer, combinam-se de maneira a caracterizar a forma como o meio interage físico-quimicamente com em contato com ele.

Dessa forma, o presente trabalho pode atuar como ponto de partida para demais investigações acerca do comportamento fluidodinâmico do petróleo em meio poroso não consolidado tendo como ponto de atenção a escolha adequada dos métodos e esquemas utilizados pelos softwares disponíveis no mercado para o processamento do modelo, bem como as considerações apropriadas para a construção e uma modelagem representativa ao problema físico que se deseja investigar.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudo das consequências de invasão cisalhante por parte do óleo;
- Avaliação numérica considerando o efeito físico do gotejamento de óleo;
- Caracterização de amostra de petróleo real para análise de percolação;
- Avaliação numérica da influência da saturação da água em meio poroso sobre o comportamento do escoamento de óleo;
- Avaliar outros cenários de contaminação de solo como por exemplo vazamento de tanques de gasolina no subsolo.

REFERÊNCIAS

AMIRI, L. et al. Estimating pressure drop and Ergun/Forchheimer parameters of flow through packed bed of spheres with large particle diameters. **Powder Technology**, v. 356, p. 310-324, 2019.

ANDRADE, J. A.; AUGUSTO, F.; JARDIM, I. C. F. Biorremediação de solos contaminados por petróleo e seus derivados. **Eclética química**, v. 35, p. 17-43, 2010.

ARAÚJO, M. E.; RAMALHO, C. W. N.; MELO, P. W. Pescadores artesanais, consumidores e meio ambiente: consequências imediatas do vazamento de petróleo no Estado de Pernambuco, Nordeste do Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 36, 2020.

BAKER, T. J. Mesh generation: Art or science?. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 41, n. 1, p. 29-63, 2005.

BARRETO, K.; SOUZA, M. O. B. Parametrização do modelo Darcy-Forchheimer para o caso do fluxo de ar em grãos de soja. In: ENCONTRO REGIONAL DE MATEMÁTICA APLICADA E COMPUTACIONAL DO RIO GRANDE DO SUL, 10, 2020. **Anais ...** Ijuí: Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2020. Disponível em: <<https://editora.pucrs.br/edipucrs/acessolivre/anais/1501/assets/edicoes/2020/arquivos/59.pdf>>. Acesso em: 9 nov. 2022.

BOYSAN, F. et al. **A fundamental mathematical modelling approach to cyclone design**. Sheffield: University of Sheffield, 1982.

BRASIL. Ministério Público Federal. Procuradoria-Geral da República. Disponível em: <<https://www.mpf.mp.br/grandes-casos/oleo-na-costa-brasileira/duvidas-frequentes>>. Acesso em 20 nov. 2022.

BRUNETTI, F. **Mecânica dos Fluidos**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

CAMPOS, L. C. **Modelagem do escoamento de fluidos em meios porosos utilizando a estrutura de dados Autonomous Leaves Graph**. 2013. 88 f. Dissertação (Mestrado em Matemática) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

CHIESA, M. et al. 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.

CHOWDHURY, M. et al. Physical properties of gram as a function of moisture content. **International Journal of Food Properties**, v. 4, n. 2, p. 297-310, 2001.

CRAIG, A. P. L. et al. Técnicas de limpeza de vazamentos de petróleo em alto mar. **Caderno De Graduação - Ciências Exatas E Tecnológicas - UNIT - SERGIPE**, v. 1, n. 1, p. 75-86, 2012.

CREMASCO, M. A. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos e outros trabalhos**. Editora Blucher, 2014.

DALLA RIVA, R. D. **Densidade, porosidade, resistência à penetração e retenção de água em resposta ao arranjo e morfometria de partículas da fração areia**. 2005. 77 f. Tese (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 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.

DOS SANTOS, P. V. et al. Impactos ambientais causados pela perfuração em busca do petróleo. **Caderno De Graduação - Ciências Exatas E Tecnológicas - UNIT - SERGIPE**, v. 1, n. 1, p. 153-163, 2012.

DULLIEN, F. A. L. **Porous media: fluid transport and pore structure**. Academic press, 2012.

FERNANDES, T. F. D.; MOREIRA, N. L. Uma interface de controle para a fluidodinâmica computacional. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 41, 2019.

GUIMARÃES, J. O. Simulação de Viscous Fingering em escoamentos em meios porosos. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

HAFSTEINSSON, H. E. **Porous media in OpenFOAM**. Chalmers University of Technology, Gothenburg, 2009.

HAUSER, J. R. Handling floating-point exceptions in numeric programs. **ACM Transactions on Programming Languages and Systems (TOPLAS)**, v. 18, n. 2, p. 139-174, 1996.

HUERTAS, J. **Avaliação experimental do Número de Reynolds**. Rio de Janeiro: Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2014.

INNOCENTINI, M. D. M.; PANDOLFELLI, V. C. Considerações sobre a estimativa da permeabilidade em concretos refratários através das equações de Darcy e de Forchheimer. **Cerâmica [online]**, v. 45, n. 292-293, p. 61-67, 2000. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0366-69131999000200003>>. Acesso em: 20 nov. 2022.

KONDAGESKI, J. H.; FERNANDES, C. V. S. Calibração de modelo matemático de qualidade da água utilizando algoritmo genético: estudo de caso do Rio Palmital, **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 14, n. 1, p. 63-73, 2009.

LOFRANO, F. C. **Escoamento em meios porosos: um modelo analítico não darciano baseado no princípio da entropia máxima**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

LOTTI, R. S. et al. Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos. **Revista Dental Press de Ortodontia e Ortopedia Facial**, v. 11, p. 35-43, 2006. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/dpress/a/6WCw3yW7WhXWnRYJRGtYzPq/?lang=pt&format=pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2022.

MACIEL, H. E. et al. **Avaliação de modelos de permeabilidade em meios porosos não consolidados**. 2015. 80 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2015.

MAITELLI, C. W. S. P. **Simulação do escoamento monofásico em um estágio de uma bomba centrífuga utilizando técnicas de fluidodinâmica computacional**. 2010. 183 f. Tese (Doutorado em Pesquisa e Desenvolvimento em Ciência e Engenharia de Petróleo) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

MARIANO, J. B. Proposta de metodologia de avaliação integrada de riscos e impactos ambientais para estudos de avaliação ambiental estratégica do setor de petróleo e gás natural em áreas offshore. 2007. Tese (Doutorado em Ciências Em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <http://www.ppe.ufrj.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/doutorado/Jacqueline_B_arboza_Mariano.pdf> Acesso em: 20 nov. 2022.

MARIĆ, T.; HÖPKEN, J.; MOONEY, K. G. **The OpenFOAM® Technology Primer**. Stan Mott, 2014.

MARTINS, S. S. S. et al. Produção de petróleo e impactos ambientais: algumas considerações. **Holos**, v. 6, p. 54-76, 2015.

MEIER, H. F. **Modelagem fenomenológica e simulação bidimensional de ciclones por técnicas da fluidodinâmica computacional**. 1998. 210f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, SP. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1585888>. Acesso em: 9 nov. 2022.

MICHALCOVÁ, V.; KOTRASOVÁ, K. Influence of Numerical Diffusion on Exactness of Calculation in Software Fluent. **Bulletin of the Transilvania University of Braşov, Series I: Engineering Sciences**, v. 5, n. 1, p. 99-106, 2012.

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.

OCAMPO GÓMEZ, D. A. **Modelagem de problemas de fluxo na escala granular usando o método Lattice Boltzmann**. 2013. 118 f., Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

ODONE, M. W. N.; TOLEDO, E. M.; BARRA, L. P. S. **Estudos numéricos na solução de problemas de mudança de fase**. 2014. 70 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2014. Disponível em: <file:///C:/Users/NOT/Downloads/maiconwilliamniebusodone.pdf> Acesso em: 15 nov. 2022.

OPENFOAM. "User Guide". Versão 2.2.2. OpenCFD Limited, 2013.

PECANHA, R. **Sistemas particulados**: Operações unitárias envolvendo partículas e fluídos. Elsevier Brasil, 2014.

PEIRÓ, J; SHERWIN, S. Finite difference, finite element and finite volume methods for partial differential equations. In: **Handbook of materials modeling**. Springer, Dordrecht, 2005. p. 2415-2446.

QUEMELLI, L. A.; NASCIMENTO, B. P.; ARRIECHE, L. S. Estudo granulométrico de chocolates artesanais elaborados em diferentes moinhos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 12., 2017, São Carlos. **Anais ...** São Paulo: Blucher, 2017.

ROSA, A. J. **Engenharia de reservatórios de petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

SHUKLA, S. K. Evaluation of numerical schemes using different simulation methods for the continuous phase modeling of cyclone separators. **Advanced Powder Technology**, v. 22, n. 2, p. 209-219, 2011.

SILVA, R. E. A. et al. Determinação da viscosidade cinemática por método de Stokes através de estudo e desenvolvimento de viscosímetro automatizado. In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM CIÊNCIAS, 3., Campina Grande. **Anais ...** Instituto Federal da Paraíba: João Pessoa, 2018. Disponível em: <http://www.editorarealize.com.br/editora/anais/conapesc/2018/TRABALHO_EV107_MD1_SA28_ID928_31052018184051.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2022.

SORIANO, H. L. **Método de elementos finitos em análise de estruturas**. EdUSP, 2003.

SOUZA, M. M. **Solução das equações de Navier-Stokes para fluidos incompressíveis via elementos finitos**. 2013. 135 f. Dissertação (Mestrado em Matemática Aplicada) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

THOMAS, J. E. **Fundamentos da Engenharia de Petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência, 2001.

VARELLA, M. D. A necessidade de repensar os mecanismos da responsabilidade ambiental em caso de riscos de vazamento de petróleo na zona econômica exclusiva no Brasil. **Revista de Direito Internacional**, v. 12, n. 1, p. 216-239, 2015.

ZORZETTO, L. F. M. **Estudo Experimental do Escoamento de Fluidos Não-Newtonianos em Meios Porosos Não Consolidados**. 1991. 155 f. Tese (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1991.