Análise em fluidodinâmica computacional do escoamento *Core-Annular Flow* em *riser* flexível com petróleo ultraviscoso

Camila Oliveira dos Santos Borges[1], Márcio André Fernandes Martins[2], Josemar Rocha Pedroso[3], Leonardo Silva de Souza[4], Nuccia Carla Arruda de Sousa*[5]

[1] borgescamila@ufba.br. Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica e Programa de Recursos Humanos para Descarbonização e Transformação Digital para a Indústria de Petróleo e Gás – PRH 41/UFBA, Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador, Bahia, Brasil. ORCID: https://orcid.org/0009-0009-9437-5578
[2] marciomartins@ufba.br. Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica e Programa de Recursos Humanos para Descarbonização e Transformação Digital para a Indústria de Petróleo e Gás – PRH 41/UFBA, Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador, Bahia, Brasil. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2390-1525
[3] josemarpedroso@ufba.br. Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica, Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador, Bahia, Brasil. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-9661-557X
[4] lssouza@ufba.br. Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica, Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador, Bahia, Brasil. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1545-8762
[5] nuccia.sousa@penedo.ufal.br. Departamento de Engenharia de Produção/Pesca, Unidade Educacional de Penedo, Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Penedo, Alagoas, Brasil. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6017-2512
* autora correspondente

Resumo
Apesar dos avanços na investigação do escoamento núcleo-anular (*core-annular flow* – CAF), ainda são escassos os estudos que avaliam o comportamento desse regime em *risers* flexíveis suspensos por boias, cuja geometria curvilínea pode modificar significativamente a dinâmica do escoamento. Com o intuito de suprir essa lacuna, este estudo analisa o comportamento multifásico óleo-água durante a elevação de petróleo ultraviscoso, utilizando o OpenFOAM para simular esse regime de escoamento no interior de um *riser*. O caso visa compreender os mecanismos hidrodinâmicos que influenciam na instabilidade do núcleo oleoso em geometrias complexas, contribuindo para a aplicação segura e eficiente dessa técnica em sistemas reais de produção. A abordagem metodológica seguiu os procedimentos usuais aplicados em simulações de Fluidodinâmica Computacional. A geometria e a malha computacional foram desenvolvidas no ambiente Salome-Meca. Na etapa de processamento, utilizou-se o solucionador *interFoam* para a resolução das equações de transporte. Os resultados foram analisados no pós-processamento por meio do software ParaView. As simulações revelaram o acúmulo de óleo ultraviscoso após a curvatura positiva do *riser*, devido à elevada inércia do fluido, que resiste às mudanças de trajetória. Tal acúmulo resultou no aumento da resistência ao escoamento e em perda de carga acentuada, com queda de pressão de 4.148,0 Pa para 3.365,8 Pa. No trecho suspenso, notou-se uma presença significativa de vórtices, devido ao elevado gradiente de velocidade, o que culminou na possível dispersão do óleo na água. Essas instabilidades geram vibrações hidráulicas que podem comprometer a integridade estrutural do sistema. Em síntese, as simulações permitiram identificar as dinâmicas interfaciais, evidenciando os desafios associados à geometria curvilínea e fornecendo subsídios técnicos para a adaptação da técnica *core-annular flow* em sistemas de produção com trajetórias não lineares.
Palavras-chave: escoamento núcleo-anular; fluidodinâmica computacional; petróleo ultraviscoso; *riser* flexível.

Early View

Computational fluid dynamics analysis of Core-Annular Flow in flexible riser with ultraviscous oil

Abstract
Despite advances in the investigation of core-annular flow (CAF), studies assessing the behavior of this flow regime in buoyancy-supported flexible risers, whose curved geometry can significantly affect flow dynamics, remain scarce. To address this gap, this study analyzes oil-water multiphase behavior during the transport of ultraviscous oil by using OpenFOAM to simulate this flow regime inside a riser. The study aims to investigate the hydrodynamic mechanisms that influence oil-core instability in complex geometries, thereby contributing to the safe and efficient application of this technique in real production systems. The methodology followed standard procedures commonly used in Computational Fluid Dynamics simulations. The geometry and computational mesh were developed using SALOME-MECA. The interFoam solver was employed to solve the transport equations, and the results were post-processed using ParaView software. The simulations revealed the accumulation of ultraviscous oil downstream of the positive-curvature section of the riser, owing to the high inertia of the fluid, which resists changes in trajectory. This accumulation increased flow resistance and was associated with a pressure decrease from 4,148.0 Pa to 3,365.8 Pa. In the suspended section, significant vortex formation was observed due to the high velocity gradient, potentially leading to oil dispersion into the water phase. These instabilities may generate hydraulic vibrations that can compromise the structural integrity of the system. Overall, the simulations enabled the identification of interfacial dynamics, highlighted the challenges associated with curvilinear geometry, and provided technical support for adapting the core-annular flow technique to production systems with nonlinear trajectories.
Keywords: *computational fluid dynamics; core-annular flow; flexible riser; ultraviscous oil.*

1 Introdução

O petróleo e seus derivados ocupam posição central na matriz energética brasileira, respondendo por 35,1% da oferta interna de energia em 2023 (EPE, 2024). Para além de sua relevância no setor energético, destaca-se também no âmbito industrial, sendo a principal matéria-prima da produção mundial de plásticos, responsável por 90,6% das 400,3 milhões de toneladas produzidas em 2022 (Plastics Europe, 2023). Segundo o Plano Nacional de Energia, esse cenário projeta uma arrecadação governamental acumulada estimada em R$ 1,8 trilhão ao longo de trinta anos, o que pressupõe a manutenção de níveis elevados de produção, da ordem de 5,5 milhões de barris por dia até 2030 (Brasil; EPE, 2020). Nesse contexto, torna-se imprescindível a ampliação e o aproveitamento das reservas disponíveis, com destaque para os óleos pesados, que correspondem a aproximadamente 40% das reservas mundiais (Temizel *et al*., 2016), impondo desafios tecnológicos significativos à cadeia de exploração e produção.

Uma das técnicas desenvolvidas com o intuito de viabilizar a extração de petróleo pesado foi a técnica *core-annular flow* (CAF). Essa técnica consiste na injeção de água entre a parede interna do duto e o óleo, formando uma película lubrificante que reduz significativamente o atrito hidráulico (Pereira Filho; Lima, 2009), possibilitando reduções superiores a 90% na queda de pressão ao longo do escoamento.

Apesar de seus benefícios, a aplicação da técnica *core-annular flow* enfrenta desafios críticos associados à estabilidade do núcleo. Variações no comportamento hidrodinâmico dos fluidos podem comprometer o perfil de escoamento desejado, afetando diretamente a segurança operacional do sistema. Tais instabilidades são particularmente acentuadas em geometrias não lineares, como no caso de *risers* flexíveis suspensos por boias de sustentação, frequentemente empregados em sistemas de elevação de petróleo em águas profundas (Conrado; Mishina; Rodrigues, 2024). A curvatura dessas estruturas introduz perturbações adicionais ao escoamento, exigindo maior compreensão dos mecanismos físicos envolvidos para garantir o desempenho e a integridade do sistema.

Early View

Diante dessa complexidade, a Fluidodinâmica Computacional (*Computational Fluid Dynamics* – CFD) surge como uma ferramenta indispensável. Por meio de simulações numéricas detalhadas, o CFD possibilita a análise do comportamento multifásico em ambientes de difícil acesso experimental, permitindo avaliar, de forma prática e economicamente viável, perfis de escoamento, gradientes de pressão e possíveis regiões de instabilidade (Maliska, 2023). A aplicação dessa abordagem contribui decisivamente para o desenvolvimento de soluções eficientes e seguras na elevação de petróleo ultraviscoso através de geometrias complexas, como *risers* flexíveis.

A CFD tem se mostrado uma ferramenta consistente na representação do escoamento CAF. Estudos como os de Ayuba *et al*. (2022) e Jiang *et al*. (2014) demonstram a capacidade dos modelos multifásicos em capturar dinâmicas interfaciais e predizer parâmetros hidráulicos, enquanto Saber, Sulaiman e Maree (2026) evidenciam a robustez da abordagem numérica na presença de inclinações e variações geométricas. Avançando para o caso específico deste trabalho, Conrado, Mishina e Rodrigues (2024) mostram a relevância da modelagem computacional na análise de escoamentos em *risers* flexíveis.

Entretanto, ainda são escassos os estudos que investigam especificamente o comportamento do escoamento núcleo-anular óleo-água em *risers* flexíveis suspensos por boias, considerando os efeitos da geometria curvilínea sobre a estabilidade da interface e a dinâmica do escoamento. Dessa forma, permanece uma lacuna quanto à compreensão da influência dessa configuração no transporte de petróleo ultraviscoso via técnica *core-annular flow*.

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo utilizar o software OpenFOAM para analisar o comportamento multifásico óleo-água no interior de *risers* flexíveis suspensos por boias de sustentação, durante o processo de elevação de petróleo ultraviscoso, empregando a técnica de escoamento *core-annular flow*. Através das simulações, busca-se compreender os mecanismos hidrodinâmicos associados à instabilidade do núcleo oleoso em geometrias complexas e fornecer subsídios técnicos que possam contribuir com a implementação segura e eficiente da técnica *core-annular flow* em sistemas reais de produção.

Dessa forma, o presente trabalho contribui para o entendimento dos mecanismos envolvidos na elevação de petróleo pesado por meio da técnica *core-annular flow*, ampliando a base científica necessária para sua aplicação em sistemas reais. Essa contribuição alinha-se diretamente às projeções de expansão da produção previstas no Plano Nacional de Energia 2050 (Brasil; EPE, 2020), fomentando a ampliação da competitividade do setor petrolífero brasileiro e o fortalecimento econômico do país.

Este artigo está estruturado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta os materiais e métodos, detalhando três etapas de desenvolvimento: Pré-processamento, que abrange a construção do domínio computacional, sua discretização e a aplicação das condições de contorno; Processamento, no qual são discutidos os conceitos fundamentais para a construção dos modelos em CFD; e, por fim, o Pós-processamento, que trata da verificação dos resultados na Seção 3. A seção 4 apresenta as conclusões e perspectivas para futuras pesquisas, destacando a importância da otimização dos sistemas.

2 Material e métodos

O ciclo clássico de implementação de uma simulação numérica trata de formular e resolver modelos capazes de representar sistemas físicos reais com o grau de fidelidade requerido pela aplicação, mantendo-se, contudo, a adequação do custo computacional. O ciclo culmina na análise crítica e na interpretação dos resultados obtidos (Tu; Yeoh; Liu, 2008). A seguir, essas etapas serão detalhadas nas subseções correspondentes.

2.1 Pré-processamento

O pré-processamento consiste na conversão de um problema físico real para um formato matemático e computacional compatível com a aplicação de métodos numéricos. Essa etapa envolve a construção de uma geometria representativa do domínio de interesse, a qual é posteriormente discretizada em subdomínios menores, denominados volumes de controle. Através do processo de

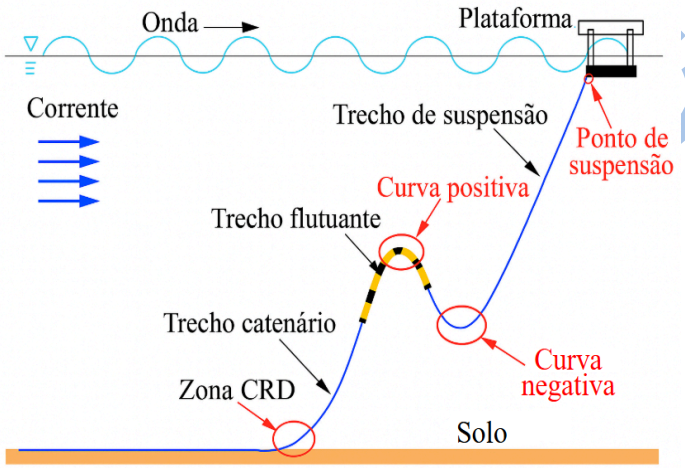
Early View

discretização, gera-se a malha, que se trata de um elemento essencial, uma vez que os solucionadores numéricos não são capazes de resolver diretamente as equações que governam o escoamento em domínios contínuos com geometria complexa (Versteeg; Malalasekera, 2007).

Na etapa de pré-processamento desse trabalho, a definição da geometria e a geração da malha computacional foram realizadas utilizando o software Salome-Meca, uma plataforma de código aberto amplamente utilizada em aplicações de simulação numérica. A escolha desse software justifica-se por sua interface gráfica intuitiva e de fácil manuseio. Além disso, o programa oferece suporte a *scripts* em Python, o que proporciona maior flexibilidade e controle ao usuário durante a modelagem geométrica e a discretização do domínio.

Neste estudo, o objeto de análise consiste em uma seção curva de um *riser* flexível suspenso por uma boia de sustentação, configurada na forma de *Lazy Wave*, ilustrada na Figura 1. Esse modelo contém as subdivisões de um *riser* flexível na configuração *Lazy Wave*, partindo da plataforma, de onde parte o trecho de suspensão, que se estende até a primeira inflexão da linha, denominada curva negativa. Em seguida, observa-se o trecho flutuante, caracterizado pela presença das boias de sustentação.

Figura 1 – *Riser* suspenso na configuração *Lazy Wave*



Fonte: adaptado de Ruan *et al*. (2016).

Dando continuidade, a linha sofre uma segunda inflexão (curva positiva) denominada *sag bend*, dando origem ao trecho catenário, onde o *riser* adquire uma forma catenária livre, ancorando-se suavemente ao fundo marinho. A região final de contato entre o *riser* e o solo é a Zona CRD (Curva de Região Dinâmica), um ponto onde há interação entre o tubo e o fundo do mar (Ruan *et al*., 2024).

Essa configuração foi selecionada por ser amplamente utilizada em operações de elevação em águas tanto rasas, quanto profundas, devido à sua capacidade de mitigar esforços excessivos oriundos tanto da movimentação da unidade flutuante quanto do próprio peso do *riser* (Bai; Bai, 2015).

A utilização direta das dimensões reais dos *risers* implicaria em um custo computacional potencializado, tanto em termos de tempo de processamento quanto de demanda por recursos de hardware. Portanto, para contornar esse problema sem comprometer a integridade física do modelo, foi adotado um fator de escala geométrica de 100:1, aplicado de forma proporcional a todos os comprimentos característicos, ou seja, foi utilizado o método da semelhança para todo o caso.

Como consequência da adoção desse fator de escala geométrica, o problema tornou-se tratável do ponto de vista computacional, ao mesmo tempo em que se mantiveram inalteradas as relações angulares e, portanto, as características geométricas fundamentais do escoamento, como inclinações ou orientações relativas.

A priori, pretendia-se analisar o comportamento do escoamento utilizando os modelos de turbulência k-ω SST e k-ε. Para isso, foi realizada uma verificação do número de Reynolds, uma vez que a redução geométrica adotada poderia alterar o regime de escoamento. Observou-se que o número

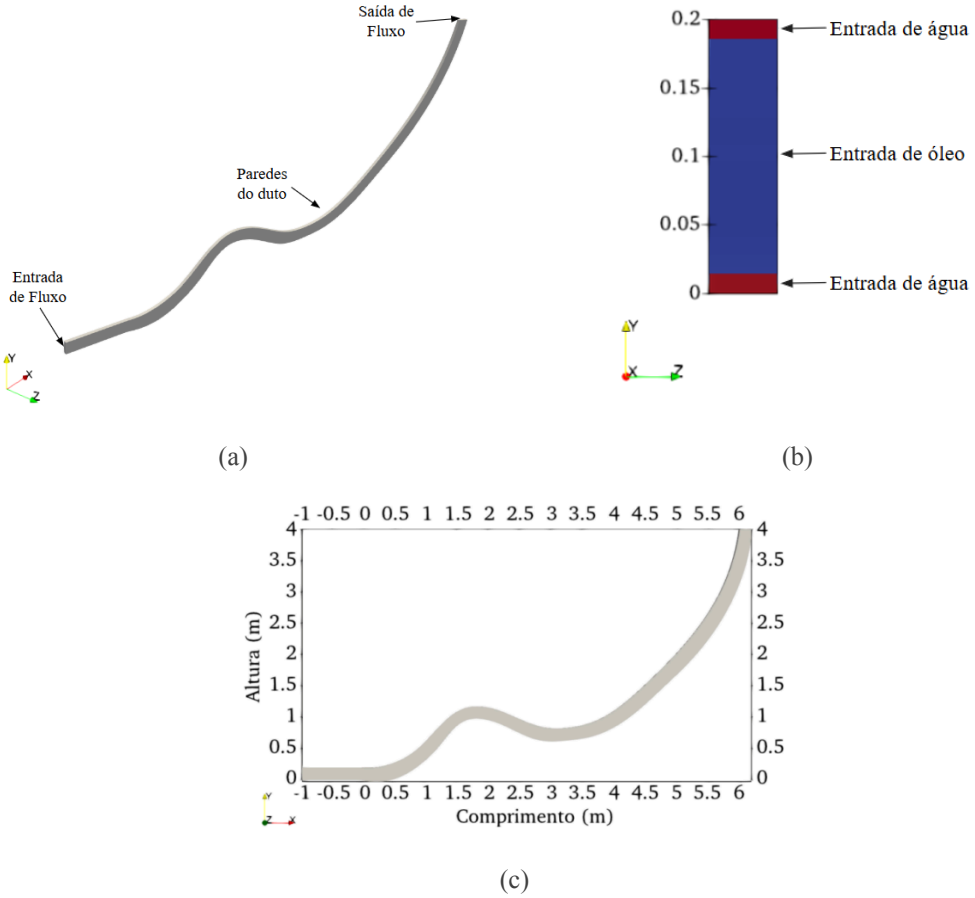
Early View

de Reynolds, foi de aproximadamente $6x10^4$, permanecendo na faixa correspondente ao regime turbulento, o que viabilizou a aplicação do modelo de turbulência k-ω SST neste estudo.

A geometria utilizada neste estudo corresponde a uma seção do duto flexível curvada, cuja extensão projetada longitudinalmente é de 6 m (comprimento), enquanto a variação vertical alcança 4 m de altura e o diâmetro é de 0,2 m.

Para uma melhor compreensão do fenômeno investigado, os elementos que compõem o domínio do duto estão ilustrados na Figura 2, em que se apresentam as principais regiões físicas do domínio e configuração da entrada de fluxo, evidenciando os pontos de injeção dos fluidos. Na figura observa-se que a água é introduzida tanto pela região superior quanto pela parte inferior da seção, enquanto a entrada de óleo ocorre pela região intermediária. Cada entrada de água possui uma altura de 0,025 m, e a entrada de óleo possui 0,15 m de altura.

Figura 2 – (a) Domínio de interesse e regiões físicas. (b) Perfil bidimensional representando a água na borda com o óleo no centro do tudo. (c) Dimensões da geometria



Fonte: elaborada pelos autores.

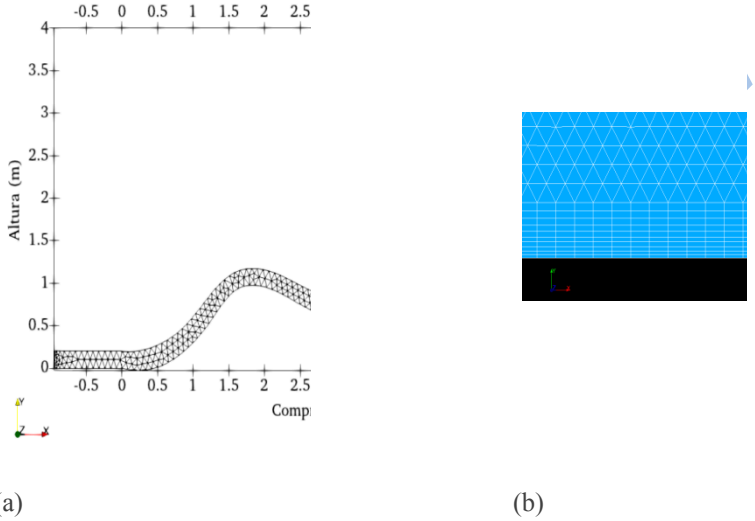
Cabe ressaltar que a geometria apresentada na Figura 2b resulta da extrusão do perfil bidimensional do duto, realizada apenas para a construção dos volumes de controle requeridos pelo método dos volumes finitos empregado pelo OpenFOAM. Para isso, foi utilizada uma única camada de células na direção perpendicular ao plano do escoamento, não havendo variação das variáveis nessa direção. Dessa forma, embora a geometria possua representação tridimensional, o problema resolvido permanece matematicamente bidimensional, reduzindo o custo computacional sem comprometer a representatividade física do escoamento.

Um fluido em movimento ao tangenciar uma superfície assume uma condição denominada de não escorregamento. Essa condição impõe que a camada de fluido em contato com a parede permaneça

estacionária, promovendo a desaceleração progressiva das camadas adjacentes em função das forças viscosas. Como resultado, estabelecem-se gradientes de velocidade normais à superfície, configurando o desenvolvimento de um perfil de velocidade. Segundo Çengel e Cimbala (2007), a região de escoamento adjacente à parede, na qual os efeitos viscosos são significativos, é chamada de camada limite.

Considerando a importância da adequada representação da camada limite para a correta resolução dos gradientes de velocidade, o domínio tridimensional foi discretizado de modo a incorporar uma camada de elementos prismáticos retangulares junto às superfícies sólidas. A Figura 3a apresenta uma seção transversal da malha computacional inicial (malha 1, apresentada na Tabela 1), utilizada para facilitar sua visualização, enquanto a Figura 3b destaca a configuração da camada prismática empregada nas proximidades das paredes.

Figura 3 – (a) Malha computacional. (b) Camada limite prismática



(a) (b)

Fonte: elaborada pelos autores.

Tabela 1 – Especificações das malhas avaliadas

	Número de Elementos	**Tempo de simulação (s)**
Malha 1	3.953	309
Malha 2	6.256	678
Malha 3	11.172	1.161
Malha 4	16.051	1.408
Malha 5	25.247	4.970
Malha 6	46.270	9.116
Malha 7	77.435	63.264
Malha 8	98.341	83.271

Fonte: dados da pesquisa.

Optou-se por adotar uma espessura de 0,05 m para essa camada ao longo das paredes inferior e superior, de modo a abranger integralmente a extensão da fase em contato com essas superfícies e representar adequadamente os efeitos viscosos nessa região.

Foram utilizadas 10 camadas prismáticas com taxa de crescimento de 1,1, a fim de garantir a adequada resolução do gradiente de velocidade próximo à parede e mitigar erros numéricos associados à transição abrupta entre elementos prismáticos e tetraédricos (Anderson, 1995; Nogueira, 2023).

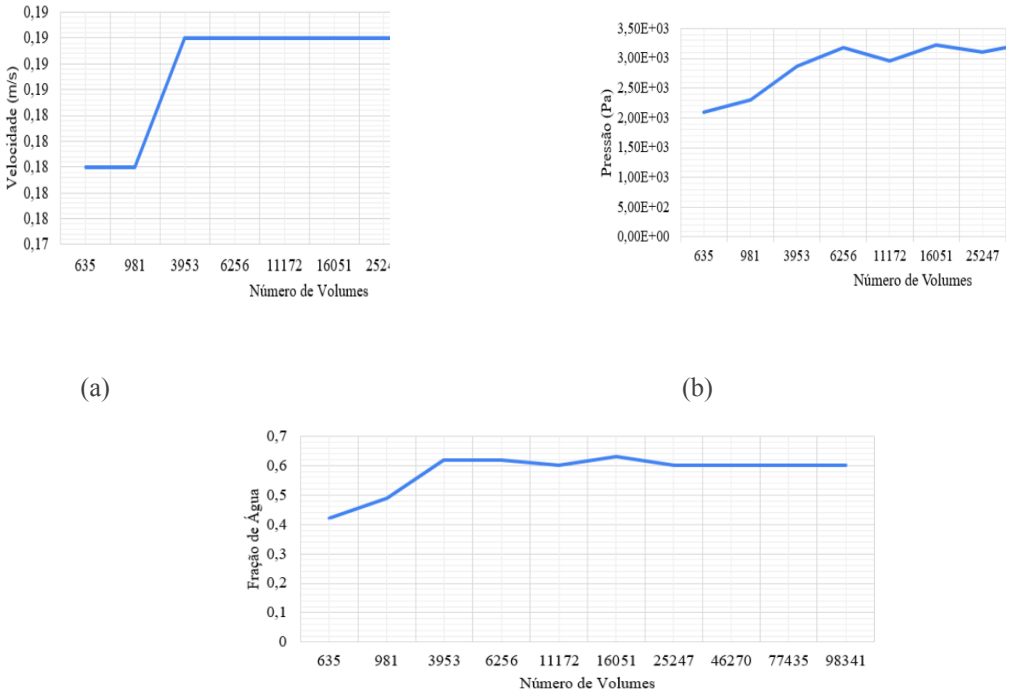
A malha prismática permite o refinamento localizado na direção normal às superfícies, com baixo impacto no número total de elementos, configurando-se como uma solução eficiente para a

otimização do custo computacional (Bahia, 2024). Esse tratamento permite uma maior precisão na resolução numérica das equações que descrevem os fenômenos de difusão viscosa, por reduzir erros de interpolação das variáveis físicas.

Em simulações numéricas baseadas em Dinâmica dos Fluidos Computacional, o grau de refinamento da malha não deve exercer influência significativa sobre os resultados obtidos (Franke, 2006). Com o intuito de assegurar a independência dos resultados em relação à discretização espacial, foi conduzido um estudo de independência de malha, no qual se analisaram oito diferentes configurações de malhas. As especificações técnicas de cada uma delas estão detalhadas na Tabela 1.

Para a realização do teste de independência de malha, foram analisadas as variações dos valores médios de pressão, fração volumétrica de água e velocidade em uma seção transversal do domínio de interesse, em função do número de volumes de controle (VC). O resultado do teste de independência de malha encontra-se apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Teste de independência de malha



(a) (b)

(c)

Fonte: elaborada pelos autores.

Observa-se que os valores da velocidade na Figura 4a estabilizam-se a partir da Malha 2, indicando baixa sensibilidade dessa variável ao refinamento. Em contrapartida, os valores de pressão exibidos na Figura 4b apresentam convergência apenas a partir da Malha 6, refletindo maior dependência da discretização espacial. Por fim, a fração volumétrica de água (apresentada na Figura 4c) demonstra comportamento estabilizado a partir da Malha 5, evidenciando a necessidade de um refinamento intermediário para garantir a precisão nessa variável.

A fim de proporcionar maior segurança no processo de seleção da malha, também foi analisado o Índice de Convergência de Malha (GCI), que quantifica a mudança da solução numérica à medida que a malha é refinada; tal índice é dado pela Equação 1 (Roache, 2009).

$$GCI = Fs\frac{|\gamma_2 - \gamma_1|}{|\gamma_2|} \quad (1)$$

Onde γ_2 é o valor da variável de interesse obtido na malha mais refinada, γ_1 é o valor da variável de interesse obtido na malha anterior à que recebeu o refinamento e Fs é o fator de segurança. Segundo Roache (2009), um valor razoável para o fator de segurança é de 1,25; assim, esse valor foi adotado neste trabalho.

Quando o Índice de Convergência de Malha calculado entre a malha refinada e sua malha imediatamente anterior apresenta um valor inferior a 5%, considera-se que a malha anterior possui precisão adequada. Essa condição permite evitar esforço computacional desnecessário, uma vez que há uma relação direta entre o número de volumes de controle e a quantidade de equações a serem resolvidas na representação numérica do domínio de estudo (Roache, 2009; Santana *et al*., 2024). Os GCIs referentes a cada uma das malhas consideradas neste estudo encontram-se expostos na Tabela 2.

Tabela 2 – Índices de Convergência de Malha

Malha anterior – Malha refinada	Erro da Pressão	GCI da Pressão	Erro Velocidade	GCI da Velocidade	Erro Fração de água	GCI da Fração de Água
Malha 1 – Malha 2	8,70%	10,87	0	0	14,29%	17,86
Malha 2 – Malha 3	20,69%	25,86	0,05	6,58	20,97%	26,21
Malha 3 – Malha 4	9,38%	11,72	0	0	0,00%	0
Malha 4 – Malha 5	6,67%	8,33	0	0	3,33%	4,17
Malha 5 – Malha 6	6,25%	7,81	0	0	3,23%	4,03
Malha 6 – Malha 7	3,23%	4,03	0	0	3,33%	4,17
Malha 7 – Malha 8	3,13%	3,91	0	0	0,00%	0
Malha 8 – Malha 9	0,00%	0	0	0	0,00%	0
Malha 9 – Malha 10	0,00%	0	0	0	0,00%	0

Fonte: dados da pesquisa.

Pela observação da Tabela 2 nota-se que o Índice de Convergência de Malha apresentou valores inferiores a 5% para todas as variáveis monitoradas (pressão, velocidade e fração volumétrica de gás) a partir das comparações entre as malhas 6 e 7. Logo, é possível inferir que a malha 6 propicia uma consistência aceitável aos resultados numéricos.

Diante dos resultados, optou-se pela utilização da malha 7, a fim de conferir uma margem de segurança numérica no que diz respeito à variável de pressão, sem comprometer significativamente o custo computacional.

Ainda na etapa de pré-processamento, é necessário definir as condições iniciais e de contorno, as quais são essenciais para viabilizar o processo de interpolação das variáveis locais desconhecidas do

escoamento durante a resolução numérica na etapa subsequente, o processamento. As condições de inicias e de contorno empregadas encontram-se exibidas na Tabela 3.

Tabela 3 – Condições iniciais e de contorno utilizadas na simulação

Condição	Paredes	Entrada de água	Entrada de óleo	Saída
Velocidade	*noSlip*	*fixedValue* [0,30 m/s]	*fixedValue* [0,15 m/s]	*zeroGradient*
Fração de água	*inletOutlet*	*fixedValue* [1]	*fixedValue* [0]	*zeroGradient*
Pressão	*fixedFluxPressure* [0 Pa]	*fixedFluxPressure* [0 Pa]	*fixedFluxPressure* [0 Pa]	*totalPressure* [0 Pa]

Fonte: dados da pesquisa.

A condição *noSlip* impõe uma velocidade nula ao fluido na direção tangencial à superfície. A definição *inletOutlet*, por sua vez, é empregada em fronteiras que podem atuar como entrada ou saída de fluxo, permitindo reversibilidade conforme o campo de velocidade local. Já a condição *fixedFluxPressure* é utilizada para ajustar o gradiente de pressão de forma a garantir a conservação de massa. A atribuição *fixedValue* estabelece valores específicos para uma determinada variável, como temperaturas, pressões ou velocidades. Sendo a condição *zeroGradient* assume um gradiente nulo na direção normal à superfície. Por fim, a condição *totalPressure* determina a pressão total em uma fronteira, incorporando as componentes estática e dinâmica (OpenCFD, 2023). A velocidade de entrada da água foi definida como o dobro da velocidade de entrada do óleo, uma vez que, segundo Coelho *et al*. (2020), essa condição favorece o estabelecimento do padrão de escoamento núcleo-anular.

Também se faz preciso determinar as propriedades físicas dos fluidos; estas foram definidas considerando uma temperatura de referência de 25 °C, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades físicas do caso

Parâmetro	Paredes
Viscosidade cinemática do petróleo	$7{,}25 \times 10^{-4}$ m²/s
Viscosidade cinemática da água	1×10^{-6} m²/s
Densidade do petróleo	854 kg/m³
Densidade da água	1.000 kg/m³
Tensão superficial	0,05 N/m
Gravidade	9,81 m/s²

Fonte: elaborada pelos autores com base em Çengel e Cimbala (2007) e Jiang *et al*. (2014).

Faz-se relevante destacar que a aceleração da gravidade atua na direção do eixo (y), conforme indicado na tríade de coordenadas da Figura 3, no sentido negativo desse eixo.

Early View

Para garantir a estabilidade numérica e a acurácia das soluções durante a simulação, é necessário estabelecer com precisão os parâmetros de controle que regem o procedimento de solução. Os parâmetros englobam a definição do incremento entre duas iterações temporais sucessivas (passo de tempo), duração total da simulação, frequência de armazenamento dos resultados e, sobretudo, as tolerâncias residuais exigidas para a convergência das equações governantes, que é um estado aceitável de equilíbrio numérico no qual os erros na solução são suficientemente baixos.

A Tabela 5 apresenta os parâmetros utilizados no estudo, adotando como critérios de convergência as variáveis do escoamento: pressão (p), fração de água (*alpha.water*) e velocidade (U). As tolerâncias impostas visam assegurar a conservação de massa e momento.

Tabela 5 – Parâmetro de controles associados aos procedimentos de solução

Parâmetro	
Tempo de início – término	0 s – 60 s
Intervalo de tempo	0,05 s
Saída de dados	0,5 s
Critério de convergência do solucionador de pressão	$1x10^{-7}$
Critério de convergência do solucionador da fração volumétrica	$1x10^{-8}$
Critério de convergência do solucionador da velocidade	$1x10^{-6}$
Tolerância de convergência absoluta	$1x10^{-6}$

Fonte: dados da pesquisa.

O tempo de simulação de 60 s foi definido por ser suficiente para que o escoamento atingisse o regime permanente. Verificou-se que, nesse instante, o perfil de velocidade encontrava-se completamente desenvolvido e não apresentava mais variações significativas ao longo do tempo. Além disso, observou-se que o padrão de distribuição das fases óleo e água havia se estabilizado, sem alterações no comportamento da interface ou na configuração do escoamento. Dessa forma, garantiu-se que os fluidos percorreram todo o domínio computacional e que as análises foram realizadas após a estabilização do escoamento.

2.2 Processamento

Durante o processamento é realizado por funções interpolares simples a aproximação das variáveis dependentes do escoamento, velocidade, pressão, temperatura, adequadas ao método numérico adotado. Em seguida, os valores aproximados das variáveis de dependência são inseridos nas equações de conservação, convertendo-as em um sistema de equações algébricas não lineares, que é resolvido iterativamente (Versteeg; Malalasekera, 2007).

As equações de conservação 2 e 3 são empregadas na solução numérica deste estudo. A Equação 2 de conservação da massa assegura que a massa total dentro de um volume de controle permanece constante ao longo do tempo, refletindo o princípio da continuidade (Çengel; Ghajar, 2009).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla . (\rho \vec{u}) = 0 \qquad (2)$$

Early

Sendo ρ a quantidade de massa por unidade de volume em kg/m^3, t o tempo em segundos (s), $\vec{u}$ o vetor velocidade do fluido em m/s e ∇ o operador gradiente (adimensional).

A Equação 3 é responsável pela formulação matemática do princípio da conservação da quantidade de movimento, garante que na ausência de forças externas, o movimento linear do sistema se mantém inalterado (Çengel; Cimbala, 2007).

$$\frac{\partial(\rho\vec{u})}{\partial t} + \nabla.\left(\rho\vec{u} \otimes \vec{u}\right) = -\nabla p + \nabla.\left[\mu\left(\nabla\vec{u} + \nabla\vec{u}^{T}\right)\right] + \rho\vec{g} + \vec{F}_{\sigma} \tag{3}$$

Onde p é a pressão em Pascal (Pa), ⊗é o produto tensorial entre vetores, g é o vetor de aceleração da gravidade que equivale a 9,81 m/s^2, $\left(\nabla\vec{u} + \nabla\vec{u}^{T}\right)$ representa o tensor taxa de deformação simétrico, usado no termo viscoso das equações de Navier–Stokes, $\vec{F}_{\sigma}$ é a força de tensão superficial por unidade de volume expressa em N/m^3.

Este artigo trata de um fluxo multifásico, partindo de uma perspectiva de integração entre as fases (mistura), as propriedades de densidade e viscosidade das fases contínuas são ponderadas pela fração volumétrica, por meio das Equações 4 e 5 (Cisco *et al*., 2022).

$$\rho = \alpha\rho_{água} + (1 - \alpha)\rho_{óleo} \tag{4}$$

$$\mu = \alpha\mu_{água} + (1 - \alpha)\mu_{óleo} \tag{5}$$

O OpenFOAM foi escolhido para a realização do processamento em razão de sua natureza de código aberto e da sua extensa biblioteca de solucionadores. Essas características conferem elevada flexibilidade e autonomia no desenvolvimento de modelos computacionais, permitindo não somente a implementação de condições físicas específicas, mais também a seleção criteriosa de esquemas numéricos, como os métodos de interpolação, discretização temporal e espacial.

Entre os solucionadores disponibilizados pelo OpenFOAM, selecionou-se o *interFoam*, um *solver* transiente, baseado na abordagem *Volume of Fluid* (VOF) para rastreamento da interface entre fluidos incompressíveis bifásicos. Esse solucionador é desenvolvido para simular o comportamento de duas fases imiscíveis utilizando uma formulação isotérmica (OpenCFD, 2023).

O solucionador *interFoam* do OpenFOAM, utiliza um esquema acoplado baseado nos algoritmos PISO (*Pressure Implicit with Splitting of Operators*) e PIMPLE (*Pressure Implicit Method for Pressure-Linked Equations*) para modelar o comportamento de escoamentos multifásicos. O método PISO ajusta iterativamente o campo de pressão, garantindo que a conservação da quantidade de movimento, Equação 3, seja satisfeita pelas velocidades obtidas.

Por sua vez, o algoritmo PIMPLE atua no controle das correlações entre os campos de pressão e velocidade, além de aplicar técnicas de sub-relaxação, que consistem na introdução de um fator de ponderação nas atualizações de variáveis de velocidade e pressão durante as iterações. A atuação do método PIMPLE implica na adição da Equação da Pressão, Equação 6 (OpenCFD, 2023).

$$\nabla\cdot\left(\frac{1}{\rho}\nabla p\right) = \nabla\cdot\vec{H} \tag{6}$$

com $\vec{H}$ representando o campo preditor de velocidade em m/s.

Early View

Em cada passo de tempo foi empregado o algoritmo PIMPLE com uma iteração externa e três iterações de acoplamento pressão-velocidade, sem correções para não ortogonalidade. Além disso, utilizou-se o recurso *adjustTimeStep*, que ajusta automaticamente o tamanho do passo de tempo para manter o número de Courant abaixo do limite especificado, contribuindo para a estabilidade numérica da simulação.

A maioria dos escoamentos apresenta flutuações de velocidade e pressão, entre outros escalares; portanto, caracteriza-se por escoamentos turbulentos, definidos pela presença de vórtices em múltiplas escalas que interagem entre si por meio da troca de energia, momento e outras propriedades conservativas. Nesse processo, os maiores vórtices extraem energia do escoamento médio e a transferem para estruturas menores, até atingir escalas suficientemente reduzidas onde os efeitos viscosos predominam, dissipando a energia cinética turbulenta e conduzindo o sistema ao equilíbrio (Rosman, 1989).

Considerando a relevância do regime turbulento nos escoamentos analisados, a seleção de um modelo de turbulência apropriado é determinante para a confiabilidade e a acurácia das simulações numéricas. Nesse sentido, será conduzida uma análise comparativa entre os modelos *k-epsilon* (k-ε) e o SST (*Shear Stress Transport*), ambos amplamente empregados na modelagem de escoamentos multifásicos e com aplicações consolidadas na indústria petroquímica (Conceição *et al*., 2017; Kang *et al*., 2021; Shi; Gourma; Yeung, 2017; Siqueira *et al*., 2019; Yang *et al*., 2026).

A análise comparativa tem como objetivo avaliar o desempenho de cada modelo na representação dos principais fenômenos associados à turbulência, como o transporte de momento e a distribuição da fração volumétrica, contribuindo para a seleção do modelo mais adequado à configuração em estudo.

O modelo de turbulência k-ε possui uma excelente sensibilidade ao gradiente de velocidade e uma convergência satisfatória com resultados de estudos experimentais na análise qualitativa do escoamento médio, além de ser o modelo turbulento mais validado de todos (Wilcox, 1998).

O modelo k-ε visa representar os escoamentos turbulentos por meio da formulação de equações de transporte para duas grandezas fundamentais, a energia cinética turbulenta (k) e a taxa de dissipação de energia turbulenta isotrópica (ε). A partir dessas equações, é possível estimar as escalas características de comprimento e velocidade da turbulência no escoamento.

O modelo assume que a viscosidade turbulenta é uma propriedade local, afetada pelas condições do escoamento na região analisada, sendo expressa como função direta de k e ε. Matematicamente, o k-ε é fundamentado na solução da Equação 7, que representa o balanço entre a produção (P), dissipação (ε) e difusão turbulenta da energia cinética.

A Equação 8 governa a evolução da taxa de dissipação isotrópica da turbulência (Lopes, 2017).

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla.\left(\vec{u}k\right) = P - \varepsilon + \nabla.\left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k}\right)\nabla k\right] \tag{7}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla.\left(\vec{u}\varepsilon\right) = C_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k}P - C_{\varepsilon 2}\frac{\varepsilon^2}{k} + \nabla.\left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\nabla\varepsilon\right] \tag{8}$$

Nessas expressões, $\vec{u}$ representa a velocidade média do escoamento, ν e ν_t são, respectivamente, a viscosidade molecular e a viscosidade turbulenta, enquanto os coeficientes $C_{\varepsilon 1}$ e $C_{\varepsilon 2}$ são as constantes de ajuste de proporcionalidade, que assumem os valores de 1,44 e 1,92, respectivamente. Já σ_k e σ_ε são as constantes de difusividade turbulenta da energia cinética turbulenta e da taxa de dissipação de energia, que equivalem a 1,0 e 1,3, nesta ordem (Launder; Spalding, 1972).

O modelo *Shear Stress Transport* (SST) consiste em uma formulação híbrida que combina as vantagens dos modelos k-ε e k-ω, de modo a proporcionar uma representação mais precisa de escoamentos turbulentos.

Nas regiões afastadas das superfícies, onde o escoamento apresenta características de fluxo livres, é empregada a modelagem baseada no k-ε, dada sua eficiência na predição da turbulência em escoamentos com altos números de Reynolds. Por outro lado, nas proximidades da parede, o modelo transita suavemente para o k-ω, que é mais eficaz na resolução da subcamada viscosa devido à sua maior sensibilidade aos gradientes de pressão adversos e aos elevados esforços de cisalhamento típicos dessas regiões (Freitas; Antonietti, 2020; Menter, 1992).

Esse modelo utiliza a Equação 9, da energia cinética turbulenta (k), para calcular a quantidade de energia associada às flutuações turbulentas. E a equação da frequência específica da turbulência (ω), Equação 10, para determinar a taxa com que a energia turbulenta é dissipada, controlando a escala temporal da turbulência no modelo (Costa, 2017).

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial\left(\rho u_j k\right)}{\partial x_j} = P_k - \beta^* \rho k\omega + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \sigma_k \mu_t\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] \tag{9}$$

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial\left(\rho u_j \omega\right)}{\partial x_j} = \alpha\frac{\omega}{k}P_k - \beta\rho\omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \sigma_\omega \mu_t\right)\frac{\partial\omega}{\partial x_j}\right] + 2(1 - F_1)\rho\sigma_{\omega 2}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial\omega}{\partial x_j} \tag{10}$$

Nas equações do modelo SST, ρ representa a densidade do fluido e P_k o termo de produção de energia turbulenta devido aos gradientes de velocidade. Os coeficientes α, β, β^*, σ_k, σ_ω e $\sigma\omega_2$ são constantes empíricas calibradas com base em dados experimentais. Os valores adotados para essas constantes são: β = 0,09, α_1 = 5/9, β_1 = 3/40, σ_{k1} = 0,85, $\sigma_{\omega 1}$ = 0,5, α_2 = 0,44, β_2 = 0,0828, σ_{k2} = 1,0 e $\sigma_{\omega 2}$ = 0,856.

As variáveis μ e μ_t referem-se à viscosidade molecular e à viscosidade turbulenta, respectivamente. Nesse modelo a função de *blending*, Equação 11, é empregada para controlar a transição entre os modelos k-ε e k-ω.

$$F_1 = \tanh\left(\left[min\left(max\left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^*\omega y}, \frac{500\nu_c}{y^2\omega}\right), \frac{4\sigma_{\omega 2}k}{CD_{k\omega}y^2}\right)\right]^4\right) \tag{11}$$

Na função de mistura F_1, a variável y representa a distância normal do ponto de interesse até a parede mais próxima, ν_c é a viscosidade cinemática e $CD_{k\omega}$ é o termo de correção da difusão cruzada, que atua na estabilização da equação de transporte de ω e é expresso como uma função dos gradientes de k e ω no domínio, como mostra a Equação 12.

$$CD_{k\omega} = max\left(2\rho\sigma_{\omega 2}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial\omega}{\partial x_j}, 10^{-20}\right) \tag{12}$$

sendo $\frac{\partial k}{\partial x_j}$ e $\frac{\partial\omega}{\partial x_j}$ os gradientes espaciais de k e ω, em cada direção x_j , onde j indica que se trata de uma soma sobre todas as direções espaciais.

O fechamento das equações médias de Reynolds é realizado por meio da hipótese de Boussinesq, na qual as tensões turbulentas são modeladas a partir de uma viscosidade turbulenta (μ_t).

Nessa abordagem, assume-se uma relação linear entre as tensões de Reynolds e a taxa média de deformação do escoamento, de modo que a viscosidade turbulenta é utilizada para representar os efeitos da turbulência sobre o escoamento médio (Versteeg; Malalasekera, 2007; Wilcox, 1998).

Após a análise dos modelos de turbulência, a próxima seção é dedicada ao pós-processamento, que apresenta os resultados extraídos. Nessa etapa foi utilizado o software ParaView, ele foi escolhido por possuir diversos utilitários que auxiliam na extração de informações relevantes sobre o comportamento do sistema e a respectiva análise dos dados obtidos.

Nesta pesquisa foi empregado o OpenFOAM com o modelo de turbulência proposto para estudar o comportamento multifásico óleo-água em *risers* flexíveis suspensos por boias de sustentação, durante a elevação de petróleo ultraviscoso, utilizando a técnica de escoamento *core-annular flow*, almejamos compreender, na próxima seção, os mecanismos hidrodinâmicos que acarretam na instabilidade do núcleo oleoso em geometrias complexas e auxiliando na aplicação segura e eficiente dessa técnica em sistemas reais de produção por meio da geração de embasamento científico.

2.3 Pós-processamento

O pós-processamento dos resultados foi realizado no software ParaView. Inicialmente, foram gerados gráficos de superfície dos campos de fração volumétrica de água, velocidade e pressão, possibilitando uma análise qualitativa da distribuição dessas variáveis ao longo do domínio computacional. Posteriormente, com o objetivo de extrair informações adicionais sobre o comportamento do escoamento, empregaram-se os filtros *Stream Tracer* e *Glyph*. O filtro *Stream Tracer* foi utilizado para gerar linhas de corrente (*streamlines*), permitindo a visualização da trajetória do fluido e a identificação dos padrões de escoamento. Já o filtro *Glyph* foi empregado para representar vetorialmente o campo de velocidades, por meio de setas orientadas segundo a direção do escoamento e escalonadas de acordo com a magnitude da velocidade, facilitando a análise da intensidade e da direção do movimento do fluido em diferentes regiões do domínio. Os resultados obtidos a partir dessas técnicas de visualização e análise são apresentados e discutidos na seção seguinte.

Os campos de velocidade, pressão e fração volumétrica apresentados na seção de resultados e discussões foram extraídos em um plano transversal do domínio computacional no plano XY.

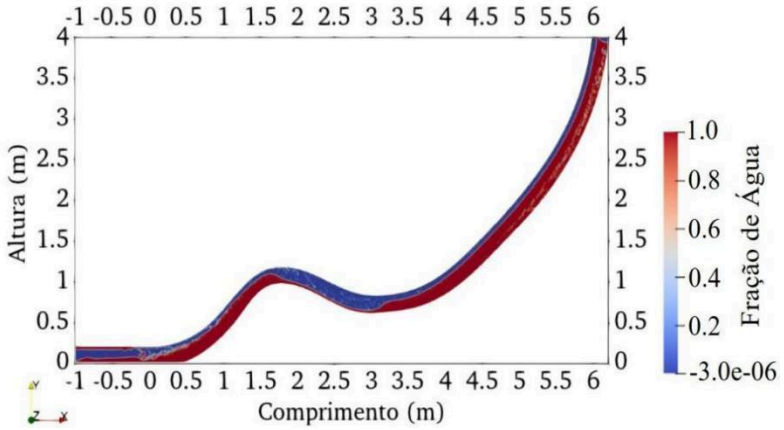
3 Resultados e discussões

O pós-processamento compreende a etapa de visualização, análise e interpretação dos resultados numéricos. Nele os dados brutos obtidos são organizados e representados graficamente, de modo a permitir uma avaliação qualitativa e quantitativa dos fenômenos físicos simulados (Versteeg; Malalasekera, 2007).

A princípio, foi realizada a análise dos gráficos de superfície correspondentes à fração volumétrica de água. Conforme ilustrado, a Figura 5 apresenta o padrão de escoamento no interior do *riser* simulado com o modelo de turbulência k-ε.

Figura 5 – Gráfico de superfície do campo de fração de água com modelo de turbulência k − ε

Early View

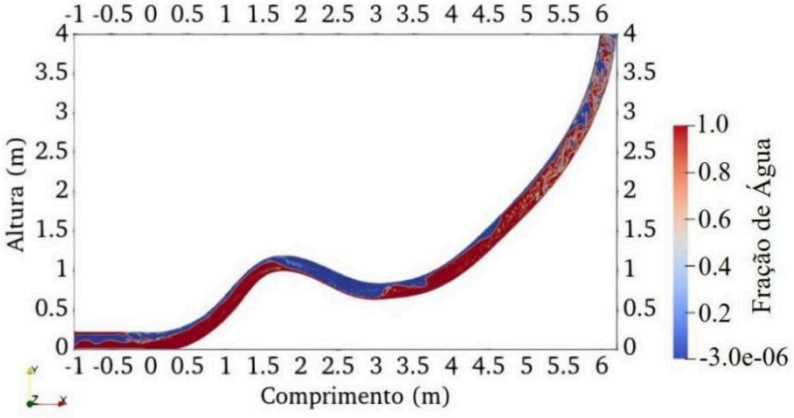


Fonte: elaborada pelos autores.

Observa-se que, na simulação com o modelo k-ε, o escoamento inicia em uma configuração núcleo-anular, mas evolui para um regime estratificado, seguido pela formação de um acúmulo oleoso na curvatura positiva do duto. Entretanto, na região ascendente do *riser*, o escoamento retorna a um padrão estratificado.

Por outro lado, a simulação com o mesmo escoamento utilizando modelo SST na Figura 6 apresenta uma diferença marcante em relação ao k-ε no comportamento interfacial observado no trecho suspenso. Nessa região, nota-se a dispersão da fase oleosa na fase aquosa, possivelmente decorrente da maior capacidade do modelo SST em lidar com gradientes de pressão adversos e efeitos de cisalhamento, o que favorece a resolução de instabilidades interfaciais.

Figura 6 – Gráfico de superfície do campo de fração de água com modelo de turbulência *Shear Stress Transport*



Fonte: elaborada pelos autores.

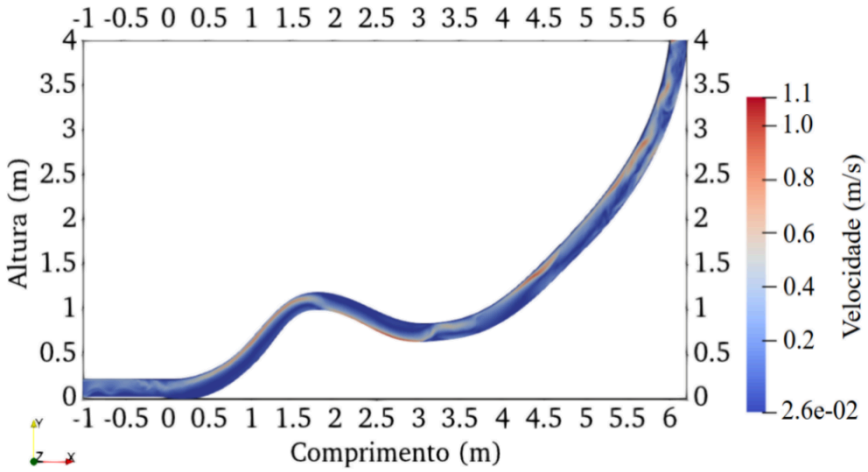
Considerando que o modelo k-ε demonstrou limitações na captura das dinâmicas entre fases, aspecto essencial para a presente investigação, optou-se pela adoção do modelo SST para a descrição da turbulência neste sistema.

Evidencia-se na Figura 6 a tendência à formação de um acúmulo de petróleo ultraviscoso na região imediatamente posterior à curva positiva do *riser*. Tal fenômeno ocorre em decorrência da mudança na direção do escoamento, a qual exige a atuação de uma força centrípeta para que o fluido acompanhe a trajetória curva do duto. No entanto, devido à sua alta densidade e viscosidade, o petróleo ultraviscoso possui maior inércia, resistindo mais intensamente às variações de trajetória impostas pela geometria do escoamento. Como resultado, observa-se uma estratificação das fases e uma posterior protrusão (descolamento) da fase oleosa. Essa configuração resulta no aumento do atrito e na elevação da perda de carga, sobrecarregando a bomba responsável pela elevação do fluido.

Early View

Em seguida, foi extraído o comportamento do campo de velocidades do escoamento bifásico por meio do gráfico de superfície mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Superfície do campo de velocidade



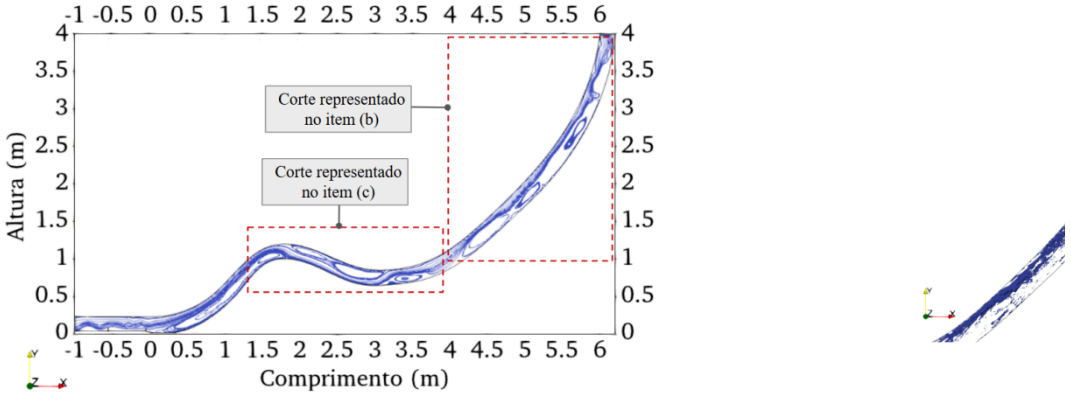
Fonte: elaborada pelos autores.

As velocidades observadas ao longo do escoamento variam entre 0,026 m/s e 1,1 m/s. Na seção ascendente da curvatura positiva do *riser*, as maiores magnitudes de velocidade concentram-se na região superior do duto, onde predomina a fase oleosa. Em contrapartida, na seção descendente da curva, os maiores valores de velocidade localizam-se na parte inferior da tubulação, associada à fase aquosa. Essa configuração estratificada de velocidades resulta em tensões de cisalhamento de distribuição espacial reduzida.

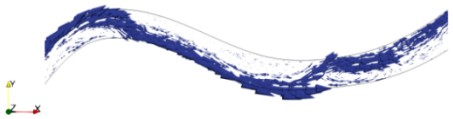
Na região subsequente, correspondente ao trecho de suspensão, verifica-se o aumento substancial dos gradientes de velocidade, os quais resultam na formação de camadas de cisalhamento com elevada extensão espacial, que promovem a ruptura da continuidade da interface entre as fases, resultando na dispersão da fase oleosa no interior da fase aquosa, como mostrado na Figura 7.

Com o objetivo de obter mais detalhes da dinâmica do escoamento bifásico, foram aplicados dois filtros nativos do software ParaView, o *Stream Tracer* e o *Glyph* que representa o trajeto percorrido pelas partículas fluidas na Figura 8.

Figura 8 – Aplicação dos filtros *Stream Tracer* e *Glyph* sobre a superfície do campo de velocidade. As figuras (a), (b) e (c) ilustram com maior clareza as direções e intensidades locais dos vetores de velocidade



(a) (b)



(c)

Fonte: elaborada pelos autores.

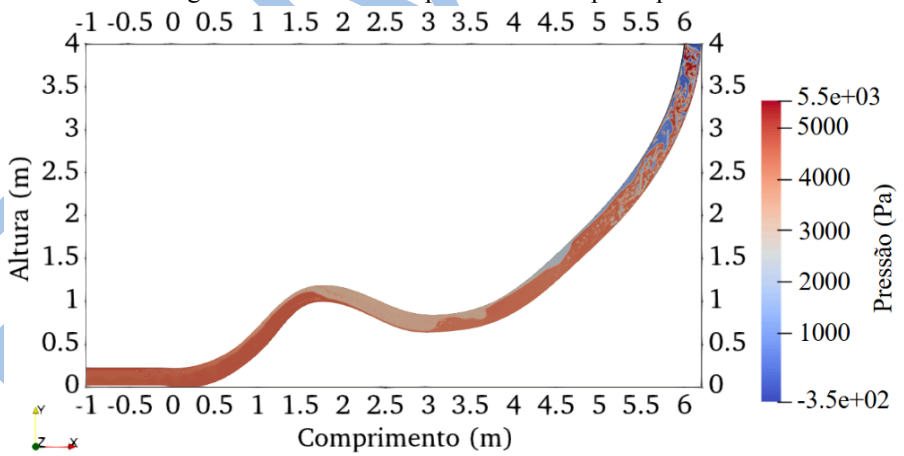
Na Figura 8a, observa-se a formação de vórtices estruturados no trecho de suspensão. Esses vórtices são oriundos das camadas de cisalhamento geradas pelo gradiente de velocidade e estão diretamente associados à dispersão do óleo na fase aquosa. Esses vórtices também se fazem presentes nas regiões de acúmulo de óleo, após as curvas positivas do *riser*, indicando que tais estruturas também estão relacionadas à residência da fase oleosa na região da curva positiva do duto. A menor distribuição espacial das tensões de cisalhamento nessa zona possivelmente influenciou na formação de vórtices de menor intensidade, que não provocam o colapso da continuidade das fases, mas favorecem o acúmulo localizado da fase oleosa.

A Figura 8b permite uma análise mais localizada da curva positiva do duto. Na seção inicial da curva, os vetores de velocidade estão alinhados à curvatura da parede, o que evidencia um escoamento relativamente ordenado. Contudo, nas seções seguintes, nota-se a presença de componentes radiais nos vetores, o que indica a ação de forças centrífugas induzidas pelas curvaturas, como mencionado anteriormente. Essas forças promovem a redistribuição lateral das fases, contribuindo para o acúmulo de óleo. Ademais, o tamanho dos vetores é proporcional à intensidade local da velocidade, nesse sentido, é notável sua diminuição nas regiões de estagnação oleosa, o que evidencia a estagnação do óleo.

A Figura 8c destaca uma quantidade significativa de vórtices no trecho de suspensão, onde ocorre o colapso da interface contínua de óleo.

Posteriormente, foi realizada a avaliação do campo de pressão por meio do gráfico de superfície exibido na Figura 9.

Figura 9 – Gráfico de superfície do campo de pressão



Fonte: elaborada pelos autores.

Na região anterior à curvatura positiva do *riser*, observa-se que a pressão média na seção transversal se mantém em torno de 4.148,0 Pa. Na região subsequente, onde é identificado o acúmulo de petróleo ultraviscoso, ocorre uma queda acentuada de pressão, atingindo aproximadamente 3.365,8 Pa. A considerável perda de carga impõe um aumento na demanda energética do sistema de bombeamento. As oscilações de pressão se intensificam no trecho de suspensão, alcançando uma variação de aproximadamente 5.500 Pa. Tal fenômeno pode gerar vibrações hidráulicas significativas, que, por sua vez, aumentam o risco de falhas estruturais no sistema de elevação de petróleo.

Early View

De modo geral, conclui-se que as curvaturas do *riser* induzem gradientes de velocidade que promovem a formação de vórtices; estes, por sua vez, desencadeiam comportamentos hidrodinâmicos anômalos, altamente prejudiciais à estabilidade do padrão *core-annular flow*. Tais efeitos podem comprometer a eficiência e segurança da elevação de petróleo ultraviscoso.

Os vórtices e distúrbios interfaciais associados à ação de forças centrífugas locais são fenômenos dificilmente observáveis em análises convencionais, revelaram-se determinantes para a compreensão dos mecanismos que comprometem a estabilidade da estrutura do núcleo oleoso e favorecem sua dispersão na fase contínua.

4 Conclusão

A utilização da fluidodinâmica computacional, por meio do software OpenFOAM, permitiu a visualização e a análise detalhada dos efeitos hidrodinâmicos decorrentes da geometria curvilínea do *riser* sobre o escoamento *core-annular*. Os resultados revelaram um acúmulo de petróleo ultraviscoso logo após a curva positiva do *riser*, devido à elevada inércia da fase oleosa, que resiste às mudanças de trajetória impostas pela curvatura do duto. Foi identificada a presença de vórtices nessa região, que promovem a estagnação do óleo.

No trecho de suspensão, observaram-se elevados gradientes de velocidade, responsáveis pela formação de camadas de cisalhamento e, consequentemente, pela geração de vórtices que culminaram na dispersão do óleo na fase aquosa. Esses gradientes também se mostraram presentes na curva positiva do *riser*. No entanto, os pontos de maior e menor velocidade configuraram-se de forma mais localizada nessa região, o que resultou em tensões de cisalhamento com distribuição espacial mais restrita e intensidade insuficiente para colapsar a interface contínua entre as fases do escoamento, diferentemente do que ocorre no trecho subsequente.

Dessa forma, conclui-se que a investigação que adotou a modelagem numérica mostrou-se uma ferramenta importante para diagnosticar comportamentos críticos do escoamento, contribuindo de forma significativa para a avaliação da segurança e da eficiência do sistema de elevação de petróleo ultraviscoso.

Devido à escassez de estudos experimentais envolvendo o escoamento núcleo-anular em *risers*, a validação experimental desse tipo de configuração ainda representa um desafio. Como continuidade desta pesquisa, recomenda-se realizar a validação experimental dos resultados obtidos, permitindo avaliar quantitativamente a capacidade preditiva do modelo de turbulência SST. Além disso, essa etapa contribuirá para aumentar a confiabilidade do modelo numérico e ampliar sua aplicabilidade na investigação do escoamento núcleo-anular em geometrias curvilíneas.

Financiamento

Os autores agradecem o apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), através do Programa de Recursos Humanos em Descarbonização e Transformação Digital para Indústria de Petróleo e Gás da Universidade Federal da Bahia (PRH 41/UFBA), sob a gestão da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo nº 2025/03627-1.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Contribuições ao artigo

BORGES, C. O. S.: concepção do estudo, pré-processamento e geração de malha computacional, execução das simulações numéricas (CFD), pós-processamento e análise dos dados hidrodinâmicos e redação do manuscrito original. **PEDROSO, J. R.:** apoio na modelagem e simulações computacionais, auxílio na análise e interpretação dos dados de escoamento e colaboração no texto. **SOUSA, N. C. A.:** orientação e supervisão da pesquisa, concepção metodológica e revisão crítica intelectual do manuscrito. **SOUZA, L. S.:** orientação e supervisão da pesquisa, análise dos aspectos fluidodinâmicos e revisão crítica intelectual do manuscrito. **MARTINS, M. A. F.:** orientação,

Early View

supervisão e revisão crítica intelectual da versão final. Todos os autores participaram da discussão dos resultados, leitura e aprovação da versão final do artigo.

Referências

ANDERSON, J. D. **Computational fluid dynamics**: the basics with applications. New York: McGraw-Hill, 1995. 547 p. (McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering; McGraw-Hill Series in Aeronautical and Aerospace Engineering).

AYUBA, N.; MACHADO, F. R.; DA ROSA, C. A.; LOPES, T. J.; DA SILVA, A. 3D interface analysis of velocity, volume ratio, and Reynolds number effects on core annular flow (CAF). **Experimental and Computational Multiphase Flow**, v. 4, n. 2, p. 133-141, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s42757-020-0076-3.

BAHIA, M. F. **Determinação de coeficientes hidrodinâmicos em *manifolds* submarinos**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Naval e Oceânica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: https://prh7.prh.ufrj.br/project/storage/app/public/productions/99931721254056_TCC_Marcelo%20Bahia_final_revisado%20(1).pdf. Acesso em: 22 fev. 2026.

BAI, Q.; BAI, Y. **Sistemas marítimos de produção de petróleo**: processos, tecnologias e equipamentos offshore. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia; EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2050.** Brasília, DF: MME: EPE, 2020. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf. Acesso em: 16 out. 2026.

CISCO, L. A.; MACIEL, R. P.; OLEINIK, P. H.; DOS SANTOS, E. D.; GOMES, M. N.; ROCHA, L. A. O.; ISOLDI, L. A.; MACHADO, B. N. Numerical analysis of the available power in an overtopping wave energy converter subjected to a sea state of the coastal region of Tramandaí, Brazil. **Fluids**, v. 7, n. 11, 359, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/fluids7110359.

COELHO, N. M. A.; TAQUEDA, M. E. S.; SOUZA, N. M. O.; DE PAIVA, J. L.; SANTOS, A. R.; LIA, L. R. B.; DE MORAES, M. S.; DE MORAES JÚNIOR, D. Energy savings on heavy oil transportation through core annular flow pattern: An experimental approach. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 122, 103127, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2019.103127.

CONCEIÇÃO, S.; LIMA, A.; ANDRADE, T.; FARIAS NETO, S.; OLIVEIRA, V.; ANGELIM, K.; ROCHA, L. Applying CFD in the analysis of heavy-oil transportation in curved pipes using core-flow technique. **International Journal of Multiphysics**, v. 11, n. 2, p. 169-186, 2017. Disponível em: https://www.themultiphysicsjournal.com/index.php/ijm/article/view/11-2-169. Acesso em: 22 out. 2026.

CONRADO, P. P. C.; MISHINA, K. D. V.; RODRIGUES, M. C. Slug flow em riser de extração de petróleo em águas profundas: uma análise numérica profunda e proposta de diagnóstico. **Revista Principia**, v. 61, n. 2, p. 383-400, 2024. DOI: https://doi.org/10.18265/1517-0306a2022id6847.

COSTA, L. M. F. **Investigação numérica de modelos de turbulência no escoamento do vento em pontes suspensas**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) –

Early View

Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. DOI: https://doi.org/10.11606/D.3.2018.tde-05032018-145557.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos**: fundamentos e aplicações. 1. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2007.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa**: uma abordagem prática. 3. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2009.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional**: Relatório Síntese 2024: Ano Base 2023. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/balanco-energetico-nacional/ben-2024/relatorio-sintese/ben_sintese_2024_pt.pdf. Acesso em: 30 set. 2026.

FRANKE, J. Recommendations of the COST Action C14 on the use of CFD in predicting pedestrian wind environment. *In*: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMPUTATIONAL WIND ENGINEERING, 4., 2006, Yokohama. **Proceedings** […]. Yokohama: Japan Association for Wind Engineering, 2006. p. 529–536. Disponível em: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jawe1982/2006/108/2006_108_529/_pdf. Acesso em: 30 jun. 2026.

FREITAS, C. M.; ANTONIETTI, A. J. Análise dos modelos de turbulência k-ε, k-ω e SST no escoamento cruzado sobre um cilindro. **Perspectiva**, v. 44, n. 166, p. 19-30, 2020. Disponível em: https://ojs.uricer.edu.br/index.php/perspectiva/article/download/96/30. Acesso em: 30 set. 2026.

JIANG, F.; WANG, Y.; OU, J.; XIAO, Z. Numerical simulation on oil-water annular flow through the π bend. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 53, n. 19, p. 8235-8244, 2014. DOI: https://doi.org/10.1021/ie403394s.

KANG, Q.; GU, J.; QI, X.; WU, T.; WANG, S.; CHEN, S.; WANG, W.; GONG, J. Hydrodynamic Modeling of Oil–Water Stratified Smooth Two-Phase Turbulent Flow in Horizontal Circular Pipes. **Energies**, v. 14, n. 16, 5201, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/en14165201.

LAUNDER, B. E.; SPALDING, D. B. **Lectures in mathematical models of turbulence**. Londres: Academic Press, 1972.

LOPES, L. B. F. **Estudo do escoamento turbulento em um canal convergente-divergente**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017. Disponível em: https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/4573/Lucas Braganca_SemAssinatura.pdf. Acesso em: 22 fev. 2026.

MALISKA, C. R. **Fundamentals of Computational Fluid Dynamics**: the finite volume method. Cham: Springer, 2023. 431 p. (Fluid Mechanics and Its Applications, v. 135).

MENTER, F. R. **Improved two-equation k-omega turbulence models for aerodynamic flows**. Moffett Field: National Aeronautics and Space Administration; Ames Research Center, 1992. (NASA Technical Memorandum, 103975). Disponível em: https://ntrs.nasa.gov/citations/19930013620. Acesso em: 30 set. 2026.

NOGUEIRA, R. S. **Simulação computacional do escoamento sobre um aerofólio NREL s809**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Aeronáutica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023. Disponível em:

Early View

https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/37725/1/SimulacaoComputacionalEscoamento.pdf. Acesso em: 22 fev. 2026.

OPENCFD. **ESI OpenCFD Release OpenFOAM® v2312**. Bracknell: OpenCFD, 2023. Disponível em: https://www.openfoam.com/news/main-news/openfoam-v2312. Acesso em: 22 fev. 2026.

PEREIRA FILHO, G. H. S.; LIMA, A. G. B. Simulação numérica do transporte de óleos pesados de alta viscosidade em risers submersos. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS, 5., 2009, Fortaleza. **Anais** [...]. Fortaleza: Associação Brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás (ABPG), 2009. Disponível em: https://pdpetro.com.br/anais/repositorio/5pdpetro/9002009.20.1.2.pdf. Acesso em: 22 fev. 2026.

PLASTICS EUROPE. **Plastics – the fast facts 2023**. Brussels: Plastics Europe, 2023. Disponível em: https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2023/. Acesso em: 30 set. 2026.

ROACHE, P. J. **Fundamentals of verification and validation**. [Socorro, NM, EUA]: Hermosa, 2009.

ROSMAN, P. C. C. Modelos de circulação em corpos d'água rasos. *In*: SILVA, R. V. C. (ed.). **Métodos numéricos em recursos hídricos**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1989. p. 156-221. (Coleção da ABRH, v. 1).

RUAN, W.; LIU, S.; LI, Y.; BAI, Y.; YUAN, S. Nonlinear dynamic analysis of deepwater steel lazy wave riser subjected to imposed top-end excitations. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OCEAN, OFFSHORE AND ARCTIC ENGINEERING, 35., 2016, Busan, South Korea. **Proceedings** […]. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2016. (v. 5: Pipelines, Risers, and Subsea Systems). Paper n. OMAE2016-54111. Disponível em: https://asmedigitalcollection.asme.org/OMAE/proceedings/OMAE2016/49965/V005T04A046/280577. Acesso em: 30 set. 2026.

RUAN, W.; ZHOU, C.; YANG, H.; WANG, Z.; SUN, B.; BAI, Y. A Review on the Recent Process of Lazy Wave Risers. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 12, n. 11, 2000, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/jmse12112000.

SABER, H. A.; SULAIMAN, M. A.; MAREE, I. E. CFD investigation of core annular flow effect on total pressure drop of the crude oil transportation at different inclination angles. **Thermal Science**, v. 30, n. 1A, p. 2019-2033, 2026. Disponível em: https://thermalscience.rs/pdfs/papers-2026/TSCI250919007S.pdf. Acesso em: 30 set. 2026.

SANTANA, F. N. R. P.; DA SILVA, G. F.; CRUZ GALVÃO, H. L.; ANDRADE MACIEL, S. T.; LOBO DOS SANTOS, J. P.; LOBATO DOS SANTOS, L. C.; PAGANO, R. L.; DE LIMA CUNHA, A. Estudo de convergência de malha para análise de recuperação de óleo em reservatório estratificado utilizando o método *Grid Convergence Index*. **Scientia Plena**, v. 20, n. 11, 114201, 2024. DOI: https://doi.org/10.14808/sci.plena.2024.114201.

SHI, J.; GOURMA, M.; YEUNG, H. CFD simulation of horizontal oil-water flow with matched density and medium viscosity ratio in different flow regimes. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 151, p. 373-383, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.01.022.

SIQUEIRA, F. C. S.; FARIAS, I. S.; MORAES JÚNIOR, D.; VIANNA JR., A. S. CFD simulation of annular oil flow wrapped with water. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 97, n. 2, p. 444-451, 2019. DOI: https://doi.org/10.1002/cjce.23326.

Early View

TEMIZEL, C.; KIRMACI, H.; INCEISCI, T.; WIJAYA, Z.; ZHANG, M.; BALAJI, K.; SUHAG, A.; RANJITH, R.; AL-OTAIBI, B.; AL-KOUH, A.; ZHU, Y.; YEGIN, C. Production optimization in heavy oil recovery processes. *In*: SPE HEAVY OIL CONFERENCE AND EXHIBITION, 1., 2016, Kuwait City. **Proceedings** [...]. Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers, 2016. Paper SPE-184135-MS. DOI: https://doi.org/10.2118/184135-MS.

TU, J.; YEOH, G. H.; LIU, C. **Computational fluid dynamics**: a practical approach. 1. ed. Burlington, MA: Butterworth-Heinemann, 2008. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=BJwuMQOhM0sC. Acesso em: 30 set. 2026.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics**: the finite volume method. 2. ed. Harlow: Pearson Education, 2007.

WILCOX, D. C. **Turbulence modeling for CFD**. 2. ed. La Cañada, CA: DCW Industries, 1998.

YANG, C.; SUN, Y.; YANG, X.; XING, Y.; GUI, X. Analyzing flotation bubble breakup behavior in stirring equipment based on SST k-ω model and VOF model. **International Journal of Coal Preparation and Utilization**, v. 46, n. 4, p. 1026-1043, 2026. DOI: https://doi.org/10.1080/19392699.2025.2489552.

Early View