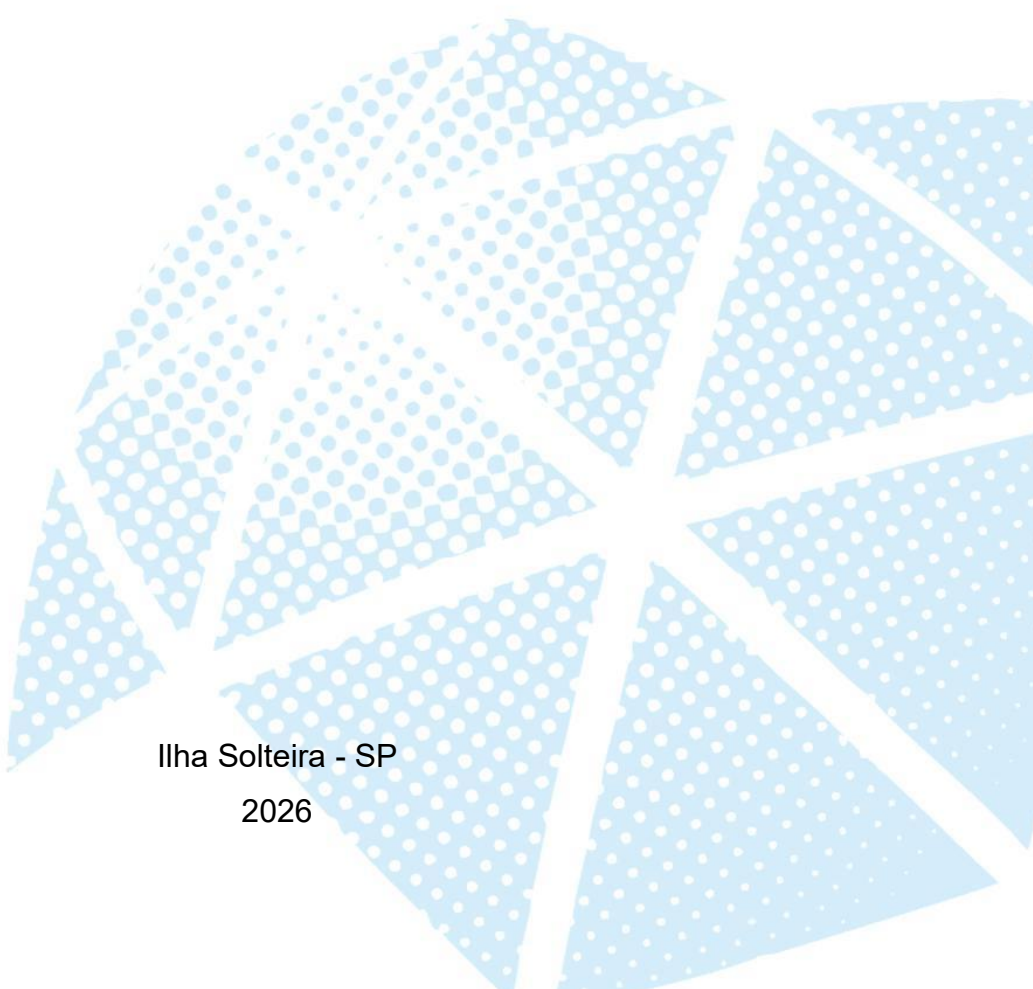


**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

LUCAS ANTONIO ZARGOLIN

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ESCOAMENTOS NÃO NEWTONIANOS EM
PROBLEMA DO TIPO *DAM-BREAK* COM COMPORTA DE ABERTURA
CONTROLADA**

Ilha Solteira - SP
2026



GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

LUCAS ANTONIO ZARGOLIN

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ESCOAMENTOS NÃO NEWTONIANOS EM PROBLEMA DO TIPO *DAM-BREAK* COM COMPORTA DE ABERTURA CONTROLADA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Estadual
Paulista (UNESP), Faculdade de
Engenharia, Câmpus de Ilha Solteira, para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil

Área de Concentração: Engenharia Civil

Orientador(a): Prof. Dr. Geraldo de Freitas
Maciel

Coorientador: Prof. Dr. João Batista
Pereira

Ilha Solteira - SP

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Z36s Zargolin, Lucas Antonio.
Simulação numérica de escoamentos não newtonianos em problema do tipo dam-break com comporta de abertura controlada / Lucas Antonio Zargolin. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
109 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2026

Orientador: Geraldo de Freitas Maciel
Coorientador: João Batista Pereira
Inclui bibliografia

1. Escoamento viscoplástico. 2. Dam-break. 3. Simulação numérica . 4. Ansys fluent.

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURSO : ENGENHARIA CIVIL
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: HIDRÁULICA E SANEAMENTO
REALIZADA EM : 20-07-2026
DISCENTE : LUCAS ANTÔNIO ZARGOLIN

COMISSÃO EXAMINADORA:

1. Prof. Dr. Geraldo de Freitas Maciel (Orientador)
2. Dr. João Batista Pereira (Examinador)
3. Dra. Fabiana de Oliveira Ferreira (Examinadora)

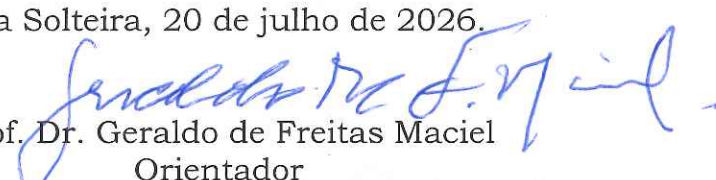
TÍTULO: "SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ESCOAMENTOS NÃO NEWTONIANOS EM PROBLEMA DO TIPO DAM-BREAK COM COMPORTA DE ABERTURA CONTROLADA"

Local: Sala 50 (DEC)

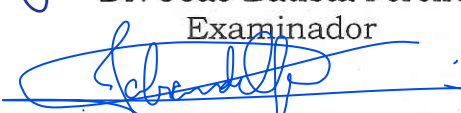
Horário de início: 10h30

Em sessão pública, após exposição em torno de 40 (quarenta minutos), o discente foi arguido oralmente, e no final da exposição foi "**APROVADO**" pelos membros componentes da Comissão Examinadora. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ATA, a qual é assinada pelos membros da Comissão Examinadora e pelo discente

Ilha Solteira, 20 de julho de 2026.


Prof. Dr. Geraldo de Freitas Maciel
Orientador


Dr. João Batista Pereira
Examinador


Dra. Fabiana de Oliveira Ferreira
Examinadora

Ciente:

Discente:



Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Cursos: Agronomia, Ciências Biológicas, Eng. Civil, Eng. Elétrica, Eng. Mecânica, Física, Matemática e Zootecnia.
Avenida Brasil Centro, 56 Caixa Postal 31 CEP 15385-000 Ilha Solteira São Paulo Brasil
pabx (18) 3743 1000 fax (18) 3742 2735 scom@adm.feis.unesp.br www.feis.unesp.br

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Rupturas de barragens de rejeitos, como as ocorridas em Fundão, em Mariana (2015), e em Brumadinho (2019), evidenciam a relevância social e técnica de ferramentas numéricas capazes de prever a propagação de escoamentos viscoplásticos liberados repentinamente. Este trabalho contribui ao incorporar explicitamente a cinemática real de abertura da comporta — incluindo aberturas graduais e em múltiplos estágios — em simulações de *dam-break*, aspecto frequentemente simplificado como evento instantâneo. O modelo foi validado contra múltiplos conjuntos de dados experimentais da literatura, envolvendo diferentes fluidos-teste viscoplásticos (géis de Carbopol e lama caulínica), reforçando a confiabilidade da metodologia para análises de risco e planejamento de medidas de mitigação. No âmbito educacional, o tutorial de reprodutibilidade apresentado no Apêndice A documenta detalhadamente os procedimentos de configuração e simulação no ANSYS Fluent, apoiando a formação de novos pesquisadores e a continuidade das pesquisas do grupo de Hidráulica e Hidrologia da FEIS/UNESP.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

Tailings dam failures, such as those at Fundão, in Mariana (2015), and Brumadinho (2019), highlight the social and technical relevance of numerical tools capable of predicting the propagation of suddenly released viscoplastic flows. This work contributes scientifically by explicitly incorporating the real kinematics of gate opening — including gradual and multi-stage openings — into dam-break numerical simulations, an aspect often simplified as an instantaneous event. The model was validated against multiple experimental datasets from the literature, covering different viscoplastic test fluids (Carbopol gels and kaolinitic mud), reinforcing the reliability of the methodology for risk analysis and disaster mitigation planning. On the educational side, the reproducibility tutorial presented in Appendix A documents the ANSYS Fluent setup and simulation procedures in detail, supporting the training of new researchers and the continuity of work carried out by the Hydraulics and Hydrology research group at FEIS/UNESP.

Dedico este trabalho à minha família que tanto me apoiou.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, que sempre confiou em mim e me apoiou incondicionalmente ao longo desta trajetória, em especial ao meu pai Paulo Sérgio Zargolin e à minha mãe Luciana Angeluci Zargolin, que deram tudo que um filho poderia querer.

Às pessoas que tornaram o caminho mais leve nos momentos difíceis e mais alegre nos momentos de conquista, em especial a alguns que nunca deixaram de estar ao meu lado desde o início de toda essa trajetória: Julia, Bruno, Pedro, Vitor, Amanda, Ana Clara, Leonardo, Helena, Vitória, Pablo. Vocês foram mais que essenciais.

Ao Prof. Dr. Geraldo de Freitas Maciel, meu orientador, pela dedicação e paciência ao longo deste trabalho, e por seu auxílio que foi muito além das dúvidas do âmbito acadêmico, estendendo-se também aos âmbitos da vida.

Ao Prof. Dr. João Batista Pereira, meu coorientador, pela disponibilidade e pelas valiosas contribuições ao longo deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão das bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), processos nº 14537, 9294 e 6233, fundamentais para o desenvolvimento deste e de trabalhos anteriores que culminaram nesta pesquisa.

“As universidades serão o que são suas bibliotecas” (Gelfand, 1968, p. 19, tradução nossa).

RESUMO

Rompimentos de barragens de rejeitos, como os ocorridos na barragem de Fundão, na cidade de Mariana (2015), e em Brumadinho (2019), evidenciam de forma trágica os riscos associados à liberação repentina de grandes volumes de material viscoplástico sobre o terreno - fenômeno conhecido na literatura técnica como *dam-break*. Compreender e prever o avanço da frente desse material e o alcance final do escoamento (*runout*) é fundamental para subsidiar análises de risco, projetos de contenção e planos de mitigação de desastres dessa natureza. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo desenvolver e validar um modelo numérico, implementado no software ANSYS Fluent, capaz de simular escoamentos viscoplásticos do tipo *dam-break* com abertura controlada de comporta, representada por meio de malha dinâmica. O modelo emprega o método *Volume of Fluid* (VOF) para o rastreamento da interface ar-fluido e o modelo reológico de Herschel-Bulkley. A validação do modelo foi conduzida por meio da reprodução numérica de casos experimentais disponíveis na literatura, empregando géis de Carbopol e lama caulínica. Os resultados obtidos mostraram boa concordância entre as simulações numéricas e os dados experimentais na fase inicial e mais dinâmica do escoamento, ao passo que divergências mais significativas surgiram na fase final, de escoamento lento, cuja origem permanece em investigação. Como contribuição adicional, este trabalho apresenta um tutorial detalhado dos procedimentos de configuração e simulação empregados, com o intuito de auxiliar a reprodutibilidade dos casos estudados.

Palavras-chave: Escoamento viscoplástico; *Dam-break*; Simulação numérica; ANSYS Fluent.

ABSTRACT

Tailings dam failures, such as those that occurred at the Fundão Dam in Mariana (2015) and in Brumadinho (2019), tragically highlight the risks associated with the sudden release of large volumes of viscoplastic material over the ground, a phenomenon commonly referred to in the technical literature as a **dam-break**. Understanding and predicting the propagation of the flow front and the final runout distance are essential for supporting risk assessment, the design of containment structures, and disaster mitigation planning. In this context, the objective of this study was to develop and validate a numerical model, implemented in ANSYS Fluent, capable of simulating viscoplastic dam-break flows with controlled gate opening represented through dynamic mesh techniques. The model employs the Volume of Fluid (VOF) method to track the air–fluid interface and the Herschel–Bulkley rheological model to describe the fluid behavior. Model validation was carried out by reproducing experimental cases reported in the literature involving Carbopol gels and kaolinitic mud. The numerical results showed good agreement with the experimental data during the initial and more dynamic stage of the flow, whereas more significant discrepancies were observed during the final slow-flow stage, the causes of which remain under investigation. As an additional contribution, this work provides a detailed tutorial describing the simulation setup and configuration procedures adopted, aiming to facilitate the reproducibility of the investigated cases.

Keywords: Viscoplastic flow; Dam-break; Numerical simulation; ANSYS Fluent.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema em corte longitudinal do canal empregado nas simulações. Dimensões e condições de contorno de cada segmento são indicadas	21
Figura 2 – Detalhamento da interface nas condições de contorno aplicadas entre a comporta, canal e reservatório	21
Figura 3 – Esquema em corte longitudinal do canal - caso de Liu (2018).....	24
Figura 4 – Aparato experimental de <i>dam-break</i> utilizado por Pereira (2023) para obtenção dos dados de validação	25
Figura 5 – Esquema em corte longitudinal do canal - caso L1 e L2	26
Figura 6 – Esquema em corte longitudinal do canal inclinado - casos de Carbopol (C1-C4)	28
Figura 7 – Frente do escoamento: comparação entre simulação numérica (malha de 5 mm), resultado numérico e dados experimentais do artigo de Liu (2018).....	30
Figura 8 – Frente do escoamento: estudo de sensibilidade de malha - caso de Liu (2018).....	30
Figura 9 – Frente do escoamento: numérico x experimental - caso L1	31
Figura 10 – Comparação entre o ensaio experimental e a simulação numérica para o caso L1 em $t = 100\text{ s}$	32
Figura 11 – Frente do escoamento: estudo de sensibilidade de malha - caso L1.....	33
Figura 12 – Frente do escoamento: numérico x experimental - caso L2.....	33
Figura 13 – Frente do escoamento: numérico x experimental - casos C1 a C4.....	34
Figura 14 – Frente do escoamento: numérico x experimental - caso C1-CI-4	35
Figura 15 – Comparação entre o ensaio experimental e a simulação numérica para o caso C1-CI-4 em $t = 100\text{ s}$	35
Figura 16 – Frente do escoamento: numérico x experimental - caso C2-CI-4	36
Figura 17 – Frente do escoamento: numérico x experimental - caso C3-CI-4	37
Figura 18 – Frente do escoamento: numérico x experimental - caso C4-CI-4	37
Figura A.1 – Localização do ANSYS Workbench no menu de programas do Windows	43
Figura A.2 – Seleção do módulo Fluid Flow (Fluent) na seção Analysis Systems e estrutura do sistema de análise criada após sua inserção na área de projeto	44
Figura A.3 – Menu de contexto da célula Geometry, com a opção New DesignModeler Geometry selecionada	45
Figura A.4 – Tela inicial do DesignModeler, com os planos de referência XYPlane, ZXPlane e YZPlane.....	45
Figura A.5 - Aba Sketching, com a paleta de ferramentas de desenho (Draw) exibida	46
Figura A.6 – Construção progressiva do rascunho dos três retângulos do domínio	47

Figura A.7 – Aba Dimensions, com as opções disponíveis para a aplicação de cotas ao desenho.....	48
Figura A.8 – Cotas (H1, H2, H3, V4 e V7) aplicadas ao desenho, com valores genéricos iniciais	48
Figura A.9 – Rascunho com as dimensões finais aplicadas às arestas do reservatório, da comporta e do canal.....	49
Figura A.10 – Seleção da opção Surfaces From Sketches no menu Concept.....	49
Figura A.11 – Painel de detalhes da superfície criada (SurfaceSk1), com a operação configurada como Add Material.....	50
Figura A.12 – Alteração da operação de Add Material para Add Frozen	51
Figura A.13 – Superfície gerada, dividida em três partes independentes (3 Parts, 3 Bodies).....	51
Figura A.14 – Seleção do Surface Body correspondente ao reservatório	52
Figura A.15 – Seleção do Surface Body correspondente à comporta.....	52
Figura A.16 – Seleção do Surface Body correspondente ao canal	53
Figura A.17 – Árvore do projeto com os três corpos renomeados: Reservatorio, Comporta e Canal	53
Figura A.18 – Seleção da célula Mesh no Project Schematic do Workbench	54
Figura A.19 – Interface do Meshing recém-aberta, com a árvore do projeto exibindo os corpos Reservatorio, Comporta e Canal e Mesh.....	55
Figura A.20 – Definição do tamanho global de elemento (Element Size) igual a 2 mm	56
Figura A.21 – Malha gerada para o domínio computacional	57
Figura A.22 – Seção Statistics do painel Details of “Mesh”, com o número de Nodes e Elements da malha gerada.....	58
Figura A.23 – Alteração do modo de seleção para Edge (Ctrl+E).....	58
Figura A.24 – Acesso à opção Create Named Selection... pelo menu de contexto ..	59
Figura A.25 – Caixa de diálogo Selection Name para criação da condição wall	59
Figura A.26 – Condição wall exibida na árvore do projeto, sob o nó Named Selections	60
Figura A.27 – Visualização isométrica das arestas (canto inferior esquerdo), utilizada para facilitar a seleção da aresta correta na região de interface	61
Figura A.28 – Nomeação das arestas da interface entre o reservatório e a comporta	62
Figura A.29 – Criação da condição de contorno da parede móvel, denominada moving_wall.....	63
Figura A.30 – Lista completa das condições de contorno (Named Selections) definidas para o domínio computacional	63
Figura A.31 – Exportação da malha no formato FLUENT Input File	64

Figura A.32 – Abertura do Fluent 2026 R1 de forma separada do Workbench.....	32
Figura A.33 – Configuração inicial e leitura da malha pelo Fluent Launcher.....	66
Figura A.34 – Interface do Fluent após a leitura da malha, com as condições de contorno reconhecidas exibidas no console.....	68
Figura A.35 – Ativação do modelo Transient e da Gravity, com aceleração de $-9,81 \text{ m/s}^2$ no eixo y	69
Figura A.36 – Seleção do modelo de viscosidade Laminar.....	70
Figura A.37 – Ativação do modelo multifásico Volume of Fluid (VOF) com a opção Implicit Body Force.....	71
Figura A.38 – Criação do material carbopol e definição do modelo reológico Herschel-Bulkley.....	72
Figura A.39 – Materiais fluidos disponíveis após a criação do carbopol-c17	73
Figura A.40 – Definição das fases do modelo multifásico	74
Figura A.41 – Criação da primeira interface de malha (comporta–canal)	74
Figura A.42 – Criação da segunda interface de malha (reservatório–comporta)	76
Figura A.43 – Confirmação, via console, da criação das interfaces de malha (intf:01 e intf:02)	77
Figura A.44 – Configuração da técnica Layering (Height Based), com Split Factor = 0,4 e Collapse Factor = 0,2	78
Figura A.45 – Adição do arquivo de código-fonte da UDF (UDF_Liu_2018.c) ao caso	79
Figura A.46 – Compilação (Build) e carregamento (Load) da biblioteca da UDF	80
Figura A.47 – Definição da zona dinâmica moving_wall como Rigid Body, com Cell Height = 0,002 m.....	81
Figura A.48 – Confirmação da zona moving_wall criada e salvamento do caso antes da pré-visualização do movimento	81
Figura A.49 – Caixa de diálogo Mesh Motion para pré-visualização do deslocamento da comporta	81
Figura A.50 – Pré-visualização do movimento da malha em diferentes instantes de tempo	81
Figura A.51 – Criação da superfície de monitoramento (linha vertical em $x = 0,10 \text{ m}$)	83
Figura A.52 – Criação de uma nova definição de relatório do tipo Surface Report > Integral	84
Figura A.53 – Definição do Field Variable (fração volumétrica da phase-2) e da superfície de referência para o monitor de altura	85
Figura A.54 – Criação de uma nova definição de relatório do tipo Expression	86
Figura A.55 – Definição da expressão frente_xf, utilizada para o monitoramento da frente de avanço do escoamento	87

Figura A.56 – Configuração do arquivo de relatório (Report File) e da frequência de gravação dos dados	88
Figura A.57 – Configuração dos critérios de convergência dos resíduos (Residual Monitors)	89
Figura A.58 – Acesso à opção Cell Registers > New > Region..., para a criação da região do fluido	89
Figura A.59 – Definição da região Fluido, com coordenadas correspondentes às dimensões do reservatório (0 a 0,3 m em x; 0 a 0,4 m em y).....	90
Figura A.60 – Inicialização do caso e configuração do contorno de fases	91
Figura A.61 – Aplicação da fração volumétrica igual a 1 para a phase-2 na região Fluido (Patch).....	92
Figura A.62 – Visualização da condição inicial das fases: Carbolpol no reservatório (vermelho) e ar no restante do domínio (azul).....	92
Figura A.63 – Configuração do salvamento automático (Autosave) a cada 10 unidades de Flow Time.....	93
Figura A.64 – Configuração da animação de solução (Solution Animation) para o contorno de fases.....	94
Figura A.65 – Painel Run Calculation, com a configuração do passo de tempo adaptativo, do número de Courant e do número máximo de iterações por passo de tempo	96
Figura A.66 – Monitoramento da simulação no Fluent: resíduos, report plots e contornos da fração volumétrica	97
Figura A.67 – Arquivo de saída frente_xf.out, referente ao monitoramento da posição da frente de onda, aberto no Bloco de Notas	99
Figura A.68 – Arquivo de saída altura-x=0.10m-rfile.out, referente ao monitoramento da altura na seção $x = 0,10$ m, aberto no Bloco de Notas	99
Figura A.69 – Frente de Escoamento x tempo obtida através do código A.1	100
Figura A.70 – Altura da fase 2 x tempo (em $x = 0.10$ m).....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros reológicos do caso de Liu (2018)	24
Tabela 2 – Configuração operacional do caso de Liu (2018)	24
Tabela 3 – Parâmetros reológicos dos casos L1 e L2.....	26
Tabela 4 – Configuração operacional dos casos L1 e L2.....	27
Tabela 5 – Parâmetros reológicos dos géis de Carbopol empregados nas simulações	28
Tabela 6 – Configuração operacional das simulações com Carbopol.....	28

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CFD	Computational Fluid Dynamics (Dinâmica dos Fluidos Computacional)
CFL	Courant-Friedrichs-Lewy
CLSVoF	Coupled Level-Set/Volume of Fluid
FEIS	Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira
GCI	Grid Convergence Index
PLIC	Piecewise Linear Interface Construction
PRESTO	PREssure STaggering Option
UDF	User-Defined Function
VOF	Volume of Fluid

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Comprimento do canal inclinado (m)
c	Comprimento (espessura) da comporta (m)
fc	Fator de colapso da malha dinâmica (Collapse Factor)
fs	Fator de divisão da malha dinâmica (Split Factor)
g	Aceleração da gravidade (m/s^2)
H	Altura total do reservatório/canal (m)
h	Altura inicial do fluido no reservatório (m)
K	Índice de consistência do modelo de Herschel-Bulkley ($\text{Pa} \cdot \text{s}^n$)
n	Índice de comportamento (Power-Law Index) do modelo de Herschel-Bulkley
p	Pressão estática (Pa)
r	Dimensão do reservatório de montante (m)
U	Campo de velocidade (m/s)
xf	Posição da frente de avanço do escoamento (m)
$\alpha 1, \alpha 2$	Fração volumétrica das fases 1 (ar) e 2 (fluido-teste)
$\dot{\gamma}$	Taxa de deformação (s^{-1})
$\dot{\gamma}c$	Taxa de deformação crítica (s^{-1})
η	Viscosidade aparente ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)
ρ	Massa específica (kg/m^3)
τ	Tensor de tensões cisalhantes (Pa)
τ_0	Tensão limite de escoamento (Yield Stress) (Pa)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
2 OBJETIVO	19
3 METODOLOGIA	20
3.1 CONDIÇÕES GERAIS DAS SIMULAÇÕES	20
3.1.1 Geometria geral e condições de contorno	20
3.1.2 Malha dinâmica.....	22
3.1.3 Rastreamento de superfície livre	22
3.1.4 Regularização da viscosidade aparente.....	23
3.1.5 Detalhamento das simulações numéricas	23
3.2 VALIDAÇÃO DO MODELO: CASO DE LIU (2018)	24
3.3 SIMULAÇÃO DA LAMA CAULÍNICA - L1 E L2	25
3.4 SIMULAÇÃO DOS GÉIS DE CARBOPOL – C1, C2, C3 E C4.....	27
4 RESULTADOS.....	29
4.1 RESULTADOS DO CASO DE LIU (2018).....	29
4.2 RESULTADOS DA LAMA CAULÍNICA (L1 E L2)	31
4.3 RESULTADOS DOS GÉIS DE CARBOPOL (C1-C4)	34
5 CONCLUSÃO	38
REFERÊNCIAS.....	40
APÊNDICE A – MANUAL PARA SIMULAÇÃO DE DAM-BREAK NÃO NEWTONIANO COM COMPORTA DESCENDENTE NO ANSYS FLUENT.....	42
A.1 Introdução	42
A.2 Inicialização do ANSYS Workbench	43
A.3 Construção da Geometria	44
A.4 Geração da Malha Computacional.....	54
A.5 Configuração da Simulação no Fluent	65
A.5.1 Configurações Gerais.....	67
A.5.2 Modelo Multifásico e Definição dos Materiais.....	70
A.5.3 Criação das Interfaces de Malha	73
A.5.4 Malha Dinâmica.....	77
A.5.5 Definição de Monitores e Arquivos de Relatório	82
A.5.6 Inicialização e Definição da Região do Fluido	89
A.6 Calculation Activities	93
A.7 Pós-processamento	97

APÊNDICE B – FUNÇÕES UDF’S UTILIZADAS PARA ABERTURAS DAS COMPORTAS NAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	103
--	-----

1. INTRODUÇÃO

Rupturas de barragens figuram entre os desastres de maior potencial destrutivo associados à engenharia hidráulica e geotécnica, podendo gerar corridas de massa e ondas de cheia capazes de provocar perdas humanas, danos à infraestrutura e impactos ambientais significativos (PIRULLI et al., 2017). Eventos recentes ocorridos no Brasil, como as rupturas das barragens de Fundão, na cidade de Mariana (2015), e de Brumadinho (2019), evidenciaram a necessidade de aprimorar o entendimento e as ferramentas de previsão desses fenômenos, em especial no que se refere à propagação de escoamentos transientes produzidos pela liberação repentina de grandes volumes de material.

Os escoamentos do tipo *dam-break* de fluidos não newtonianos constituem um problema clássico na mecânica dos fluidos, com aplicações em geofísica, hidráulica e ciência dos materiais (ANCEY, 2007; ANCEY e COCHARD, 2009; COUSSOT, 2017; PEREIRA e MACIEL, 2021). Esse tipo de escoamento é amplamente empregado como modelo físico simplificado para deslizamentos e rupturas de barragens (JEYAPALAN et al., 1983; ANCEY et al., 2012). Nesses ensaios, a liberação de um volume previamente confinado permite investigar a interação entre efeitos gravitacionais, inerciais e reológicos, seja em regime transiente ou em estado final de repouso.

Estudos experimentais conduzidos em canal inclinado demonstraram que o processo de formação da brecha, representado em laboratório por sistemas de comporta com abertura controlada, exerce influência determinante sobre o hidrograma de ruptura e sobre o desenvolvimento espaço-temporal da frente viscoplástica (LIU, 2018; PEREIRA, 2023).

Aberturas instantâneas tendem a intensificar os efeitos inerciais, promovendo maior aceleração inicial da frente, enquanto aberturas graduais atenuam o pico de vazão e produzem evolução temporal distinta do alcance. Observou-se ainda que o número de estágios e o sentido de movimento da comporta interferem na dinâmica de liberação do material, impactando principalmente as fases iniciais do escoamento, quando os efeitos transientes são mais pronunciados (ROUSSEL e COUSSOT, 2005; GAO e FOURIE, 2015).

Do ponto de vista numérico, embora modelos baseados nas equações completas de *Navier-Stokes* com rastreamento de superfície livre sejam amplamente utilizados, muitas abordagens ainda simplificam a ruptura como evento instantâneo, desconsiderando a cinemática real da comporta. Essa idealização pode comprometer a representação dos hidrogramas de ruptura, dos efeitos inerciais iniciais e da evolução temporal do *runout*.

Assim, torna-se essencial incorporar explicitamente, no modelo computacional, a dinâmica de abertura da comporta por meio de técnicas de malha dinâmica, permitindo simular diferentes velocidades, sentidos e modos de abertura. Nesse contexto, o presente trabalho apresenta o desenvolvimento numérico de escoamento não newtoniano do tipo *dam-break* que incorpora essa cinemática e avalia seus efeitos sobre o alcance transiente e o *runout* final, em confronto com dados experimentais da literatura. Como contribuição adicional, este trabalho apresenta um tutorial detalhado dos procedimentos de configuração e simulação no ANSYS Fluent empregados, com o intuito de auxiliar a reprodutibilidade dos casos estudados.

2. OBJETIVO

O presente Trabalho de Conclusão de Curso teve como objetivo geral desenvolver e validar modelo numérico em ANSYS Fluent 2026R1 para simulação de escoamentos não newtonianos do tipo *dam-break* com comporta de abertura controlada, analisando o desenvolvimento temporal e o alcance final das frentes viscoplásticas.

Para o alcance do objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) implementar o modelo reológico de Herschel-Bulkley com regularização numérica apropriada;
- b) modelar a superfície livre por meio do método *Volume of Fluid* (VOF);
- c) implementar malha dinâmica para representar o movimento ascendente e descendente da comporta;
- d) reproduzir numericamente configurações experimentais descritas na literatura;

- e) avaliar o desenvolvimento temporal do alcance da frente de escoamento;
- f) confrontar resultados numéricos e experimentais quanto ao *runout* final e à evolução temporal;

Como objetivo complementar, este trabalho buscou elaborar um tutorial detalhado dos procedimentos de configuração e simulação no ANSYS Fluent, visando facilitar a reprodução dos casos estudados e contribuir para a reprodutibilidade dos resultados obtidos.

3. METODOLOGIA

Este capítulo descreve a metodologia adotada para o desenvolvimento e a validação do modelo numérico. Inicialmente, são apresentadas as configurações gerais das simulações, abrangendo a definição da geometria, das condições de contorno, da malha dinâmica, do método de rastreamento da superfície livre, da regularização da viscosidade aparente e das principais configurações numéricas. Na sequência, são descritos os casos utilizados para validação do modelo, incluindo os parâmetros geométricos, reológicos e operacionais considerados para cada conjunto de simulações.

Visando garantir a reprodutibilidade da metodologia, os procedimentos de construção da geometria, geração da malha, configuração do modelo numérico e pós-processamento foram documentados em um tutorial detalhado, disponibilizado no **Apêndice A**.

3.1 CONDIÇÕES GERAIS DAS SIMULAÇÕES

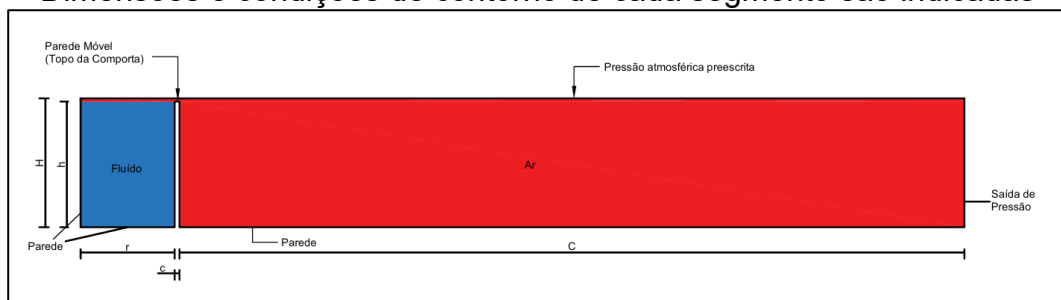
3.1.1 Geometria geral e condições de contorno

A geometria foi representada em corte longitudinal bidimensional, incluindo reservatório de montante de comprimento r , comporta móvel com comprimento c e canal inclinado de dimensão C , altura total definida como H e altura de fluido no reservatório de h (Figura 1). A construção geométrica foi realizada no ANSYS

DesignModeler e a malha gerada no *ANSYS Meshing*, com elementos estruturados regulares e refinamento na região de propagação da frente.

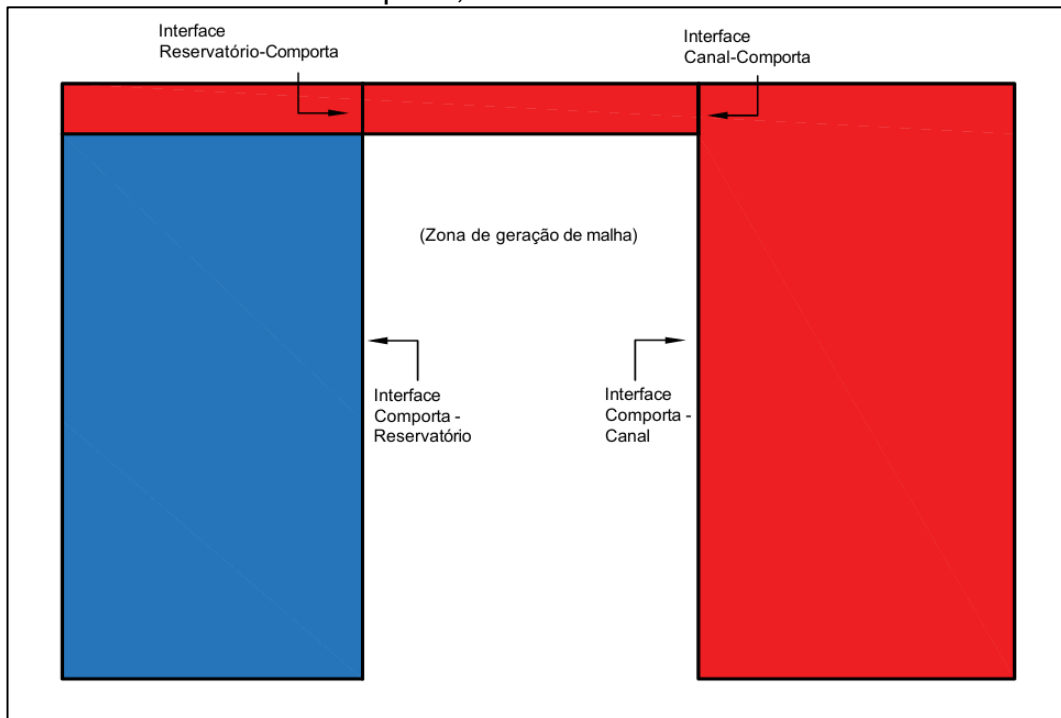
Foram adotadas condições de contorno de não deslizamento nas paredes sólidas, pressão atmosférica na região aberta e condição de fronteira móvel associada à comporta, implementada por malha dinâmica. Associada aos pontos de encontro entre o reservatório e a comporta e o canal e a comporta, foi aplicada a condição de interface, detalhada na Figura 2.

Figura 1 - Esquema em corte longitudinal do canal empregado nas simulações. Dimensões e condições de contorno de cada segmento são indicadas



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 2 - Detalhamento da interface nas condições de contorno aplicadas entre a comporta, canal e reservatório



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

3.1.2 Malha dinâmica

A movimentação da comporta modifica o domínio computacional a cada passo de tempo, exigindo o uso de malha dinâmica. Entre as técnicas disponíveis no ANSYS Fluent (*Remeshing*, *Smoothing* e *Layering*), adota-se o método *Layering*, adequado para malhas estruturadas. A técnica consiste na adição ou remoção automática de camadas de volumes de controle adjacentes à fronteira móvel. Quando a altura de uma camada excede um limite predefinido, ocorre divisão; quando diminui abaixo de um valor crítico, ocorre colapso da camada. Neste trabalho foram utilizados fatores de divisão e colapso iguais a $f_s = 0,4$ e $f_c = 0,2$. A velocidade da comporta foi prescrita por meio de UDF (User-Defined Function) utilizando a função `DEFINE_CG_MOTION`, permitindo simular abertura instantânea ou gradual.

A verificação numérica foi conduzida por meio de testes de sensibilidade envolvendo refinamento de malha, passo de tempo, parâmetro de regularização e critério de convergência, sendo a avaliação de erro realizada pelo *Grid Convergence Index (GCI)*, conforme procedimento descrito por Celik et al. (2008).

3.1.3 Rastreamento de superfície livre

A interface ar-fluido é rastreada por meio do método *Coupled Level-Set/VoF (CLSVoF)*, no qual são resolvidas frações volumétricas para as duas fases (α_1 para o ar e α_2 para o fluido-teste). Em cada célula da malha, $\alpha_1 = 1$ indica presença exclusiva de ar, $\alpha_1 = 0$ indica presença exclusiva de fluido e $0 < \alpha_1 < 1$ identifica a região de interface, obedecendo à condição de conservação.

A reconstrução da interface é realizada pelo método *Geo-Reconstruct*, similar ao esquema *PLIC (Piecewise Linear Interface Construction)*. Na região interfacial, propriedades físicas como massa específica e viscosidade aparente são interpoladas linearmente em função da fração volumétrica. Essa abordagem permite capturar adequadamente a evolução da superfície livre durante a propagação da frente viscoplástica.

3.1.4 Regularização da viscosidade aparente

Fluidos viscoplásticos descritos pelos modelos de Bingham ou Herschel-Bulkley apresentam viscosidade aparente tendendo ao infinito quando a taxa de deformação tende a zero (COUSSOT, 2014). Para garantir estabilidade numérica, emprega-se regularização da função viscosidade, aproximando-a por valores elevados, porém finitos em baixas taxas de deformação (FRIGAARD, 2005).

Neste trabalho foi utilizado o modelo bi-viscoso implementado no ANSYS Fluent por meio de UDF, no qual é introduzida uma taxa de deformação crítica $\dot{\gamma}_c$. Para $\dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_c$, a viscosidade é suavizada; para $\dot{\gamma} > \dot{\gamma}_c$, aplica-se a forma clássica do modelo de Herschel-Bulkley. O valor de $\dot{\gamma}_c = 0,01 \text{ s}^{-1}$ foi adotado conforme estudos anteriores (SÁO, 2021), garantindo equilíbrio adequado entre estabilidade numérica e fidelidade física.

3.1.5 Detalhamento das simulações numéricas

As discretizações espaciais e temporais empregadas neste trabalho seguem a formulação geral do método dos volumes finitos descrita por Moukalled, Mangani e Darwish (2016). O acoplamento pressão-velocidade foi realizado pelo método *Coupled*, com gradientes avaliados por mínimos quadrados baseados em volumes de controle. A interpolação de pressão foi realizada pelo método *PREssure STaggering Option (PRESTO!)*, enquanto a discretização espacial dos termos convectivos foi feita por *Second-Order Upwind*.

A reconstrução da interface foi realizada pelo método *Geo-Reconstruct*, e a discretização temporal foi realizada pelo esquema *First-Order Implicit*, adequado para estabilidade em escoamentos transientes com superfície livre.

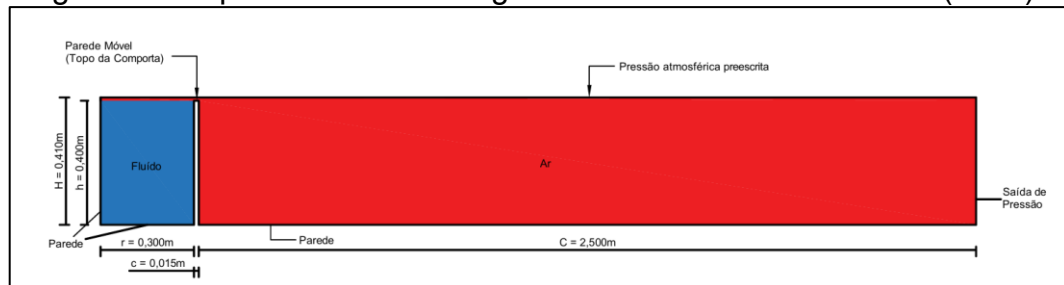
O passo de tempo é variável e controlado pelo critério de *Courant-Friedrichs-Lewy* (CFL), adotando-se $CFL = 0,10$. O critério de convergência em cada passo de tempo considerou resíduos normalizados inferiores a 10^{-6} para continuidade e momentum.

3.2 VALIDAÇÃO DO MODELO: CASO DE LIU (2018)

O caso de Liu (2018) foi adotado como referência inicial de validação do modelo numérico, por se tratar de um experimento de *dam-break* com geometria simples e dados de *runout* disponíveis para comparação direta.

Para essa simulação, foi definido um canal longitudinal contendo um reservatório de dimensão $r = 0,300$ m, comporta de espessura $c = 0,015$ m e canal de comprimento $C = 2,500$ m, com altura total do reservatório $H = 0,41$ m e altura inicial de fluido $h = 0,40$ m (Figura 3).

Figura 3 - Esquema em corte longitudinal do canal - caso de Liu (2018)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

O fluido-teste empregado por Liu (2018) corresponde a um gel de Carbopol 940 de concentração mássica igual a 0,14%, cujo comportamento reológico é descrito pelo modelo de Herschel-Bulkley; os parâmetros reológicos correspondentes estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros reológicos do caso de Liu (2018)

Ensaio	τ_0 (Pa)	K_n (Pa · s ⁿ)	n	ρ (kg/m ³)
Liu (2018)	4,40	25,50	0,37	1000,00

Fonte: Liu (2018)

Tabela 2 - Configuração operacional do caso de Liu (2018)

Ensaio	Fluido-teste	Inclinação (°)	Velocidade comporta (m/s)	Posição da comporta (mm)*
Liu (2018)	Carbopol 940 0,14%	0 (horizontal)	0,16	400 - 0

*posição inicial - posição final (abertura única).

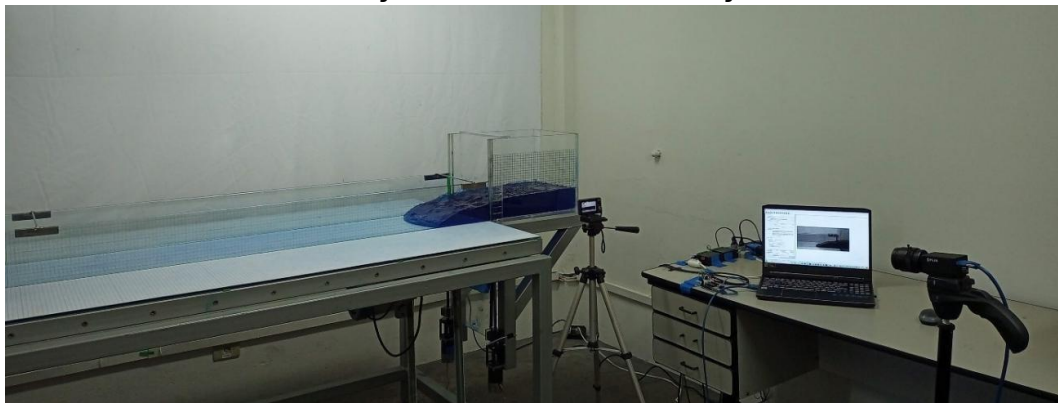
Fonte: Liu (2018)

A movimentação da comporta foi implementada por meio de uma função UDF do tipo `DEFINE_CG_MOTION`, cujos parâmetros de velocidade e posição estão detalhados na Tabela 2; o código-fonte completo é apresentado no Apêndice B. Para verificar a independência dos resultados em relação à discretização espacial, foi conduzido um estudo de sensibilidade de malha para o caso de Liu (2018), considerando malhas de tamanho de 10 mm, 5 mm e 2 mm, com avaliação pelo método do GCI.

3.3 SIMULAÇÃO DA LAMA CAULÍNÍTICA - L1 E L2

Avançando para um fluido-teste com comportamento reológico mais próximo de aplicações práticas em rompimento de barragem, foram simulados os casos L1 e L2, referentes a ensaios de *dam-break* com lama caulínítica realizados por Pereira (2023).

Figura 4 - Aparato experimental de *dam-break* utilizado por Pereira (2023) para obtenção dos dados de validação



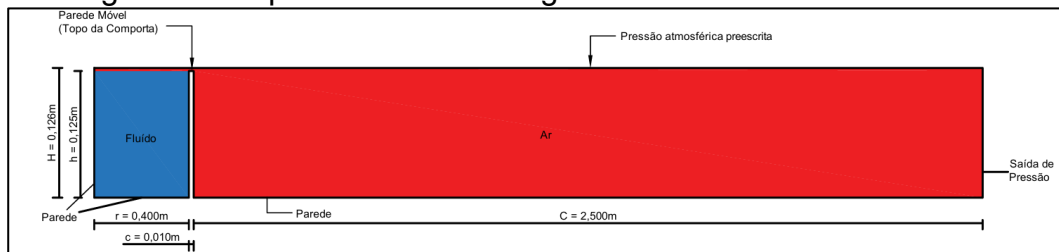
Fonte: Pereira (2023)

O aparato (Figura 4), descrito em detalhe por Pereira (2023), é constituído por uma mesa de sustentação em perfil metálico ($2,0 \times 1,0 \times 0,90 \text{ m}$) sobre a qual se apoia uma base móvel de vidro temperado, responsável por conferir a inclinação do canal (0° a 20°) por meio de um sistema motorizado de barras roscadas. Duas placas de vidro adicionais podem ser fixadas sobre essa base para confinar o escoamento, formando um canal de seção transversal de 30 cm de largura por 15 cm de altura. Nas extremidades do canal são acoplados os módulos de retenção (reservatório e comporta, confeccionados em acrílico), disponíveis em duas configurações: abertura

ascendente (instantânea) e descendente (gradual, com definição de estágios de abertura), sendo esta última empregada nas simulações do presente trabalho. O registro do escoamento é feito por três câmeras: uma câmera de alta taxa de amostragem (GS3 FLIR, fps > 100) posicionada lateralmente para o acompanhamento da frente de avanço; uma câmera de vista superior (Lumix FH8) para registro da mancha de inundação; e uma câmera frontal ao reservatório (Cyber-Shot DSC-W800). A calibração das imagens é realizada por meio de uma malha de referência quadriculada ($10 \times 10 \text{ mm}$) fixada sobre as superfícies de interesse. Esse aparato foi utilizado tanto nos ensaios com lama caulinítica (L1 e L2) quanto nos ensaios com géis de Carbopol, descritos, respectivamente, nas Seções 3.3 e 3.4.

Para essas simulações, foi definido um canal longitudinal contendo um reservatório de dimensão $r = 0,400 \text{ m}$, comporta $c = 0,010 \text{ m}$ e canal $C = 2,500 \text{ m}$, com altura total do reservatório $H = 0,126 \text{ m}$ e altura de fluido $h = 0,125 \text{ m}$ (Figura 5). O mesmo aparato (mesma geometria de canal) foi utilizado nas simulações com géis de Carbopol, descritas na sequência, variando-se apenas o fluido-teste e inclinação.

Figura 5 - Esquema em corte longitudinal do canal - caso L1 e L2



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

O fluido-teste dos casos L1 e L2 corresponde à lama caulinítica caracterizada experimentalmente por Pereira (2023), cujo comportamento reológico foi descrito pelo modelo de Herschel-Bulkley. Os parâmetros reológicos de ambos os ensaios (L1-0 e L2-0) estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros reológicos dos casos L1 e L2

Ensaio	$\tau_0 \text{ (Pa)}$	$K_n \text{ (Pa} \cdot \text{s}^n)$	n	$\rho \text{ (kg/m}^3)$
L1-0	20,62	0,38	0,81	1463,00
L2-0	21,24	0,24	0,90	1450,00

Fonte: Pereira (2023)

Tabela 4 - Configuração operacional dos casos L1 e L2

Ensaio	Fluido-teste	Inclinação (°)	Velocidade comporta (mm/s)	Posição da comporta (mm)*
L1-0	L_AA_28	0 (horizontal)	9,10	125 - 0
L2-0	L_AA_28	0 (horizontal)	9,10	125 - 62,5 - 0

*posição inicial – intermediária - posição final

Fonte: Pereira (2023)

A movimentação da comporta nesses casos também foi implementada por meio de UDF (DEFINE_CG_MOTION), com parâmetros detalhados na Tabela 4; o código-fonte é apresentado no Apêndice B. Diferentemente do caso L1, que conta com abertura única, o caso L2 envolve abertura com um estágio intermediário (125 → 62,5 → 0 mm, com tempo de parada de 10 s durante o estágio intermediário).

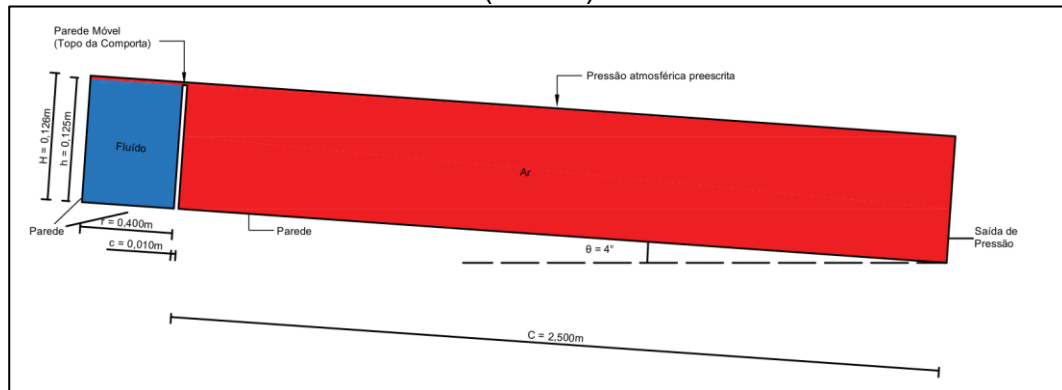
De forma análoga ao caso de Liu (2018), foi conduzido um estudo de sensibilidade de malha para o caso L1, considerando malhas de tamanho de 15 mm, 10 mm e 5 mm.

3.4 SIMULAÇÃO DOS GÉIS DE CARBOPOL – C1, C2, C3 E C4

Por fim, para investigar a influência do número de estágios de abertura da comporta sobre o desenvolvimento do escoamento, foram simulados quatro ensaios com géis de Carbopol (C1-CI-4 a C4-CI-4, em que a sigla "CI" identifica a configuração de canal inclinado empregada), também com base nos ensaios experimentais de Pereira (2023). Para essas simulações, foi utilizado o mesmo aparato descrito para o caso L1: canal longitudinal contendo reservatório de dimensão $r = 0,400$ m, comporta $c = 0,010$ m e canal $C = 2,500$ m, com altura total do reservatório $H = 0,126$ m e altura de fluido $h = 0,125$ m, inclinado a 4° (Figura 6).

Os parâmetros reológicos de cada ensaio com géis de Carbopol, obtidos experimentalmente por Pereira (2023) e descritos pelo modelo de Herschel-Bulkley, estão apresentados na Tabela 5.

Figura 6 - Esquema em corte longitudinal do canal inclinado - casos de Carbopol (C1-C4)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 5 - Parâmetros reológicos dos géis de Carbopol empregados nas simulações

Ensaio	τ_0 (Pa)	K_n (Pa · s ⁿ)	n	ρ (kg/m ³)
C1-CI-4	28,66	6,33	0,45	1010,72
C2-CI-4	30,09	5,80	0,46	1010,86
C3-CI-4	27,91	7,42	0,42	1008,53
C4-CI-4	27,13	7,86	0,42	1009,58

Fonte: Pereira (2023)

Em todos os ensaios, a velocidade de abertura da comporta foi de 9,10 mm/s, variando-se o número de estágios de abertura: C1-CI-4 com abertura única (125-0 mm), C2-CI-4 com dois estágios intermediários (125-75-25-0 mm), C3-CI-4 com um estágio intermediário (125-62,5-0 mm) e C4-CI-4 com quatro estágios (125-100-75-50-25-0 mm), conforme detalhado na Tabela 6, cada estágio com um intervalo de 20 s de parada.

Tabela 6 - Configuração operacional das simulações com Carbopol

Ensaio	Fluido-teste	Inclinação (°)	Velocidade comporta (mm/s)	Posição da comporta (estágio de abertura) (mm)*
C1-CI-4	C-17	4	9,10	125 - 0
C2-CI-4	C-17	4	9,10	125 - 75 - 25 - 0
C3-CI-4	C-17	4	9,10	125 - 62,5 - 0
C4-CI-4	C-17	4	9,10	125 - 100 - 75 - 50 - 25 - 0

*posições sucessivas da comporta ao longo dos estágios de abertura.

Fonte: Pereira (2023)

Para os casos com múltiplos estágios de abertura (C2-CI-4, C3-CI-4 e C4-CI-4), a UDF (DEFINE_CG_MOTION) utilizou condições de paradas baseadas no tempo de simulação. O código-fonte completo de cada caso está disponível no Apêndice B.

4. RESULTADOS

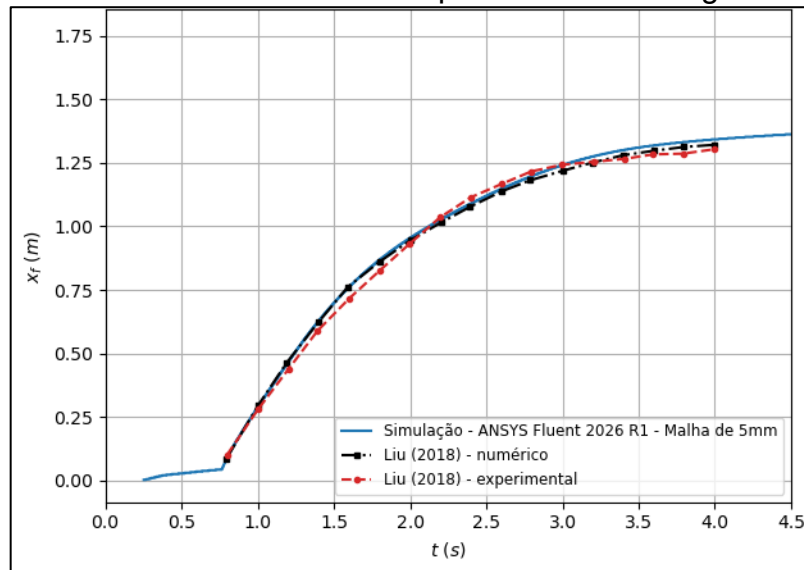
Este capítulo apresenta os resultados das simulações numéricas realizadas e sua comparação com dados experimentais disponíveis na literatura. A discussão está organizada de acordo com os diferentes casos de validação empregados, iniciando-se pelo caso de Liu (2018), seguido pelos ensaios com lama caulinítica (L1 e L2) e, por fim, pelos casos envolvendo géis de Carbopol (C1 a C4). Para cada conjunto de simulações, são avaliadas a evolução temporal da frente de escoamento, a influência das configurações adotadas e a concordância entre os resultados numéricos e experimentais, permitindo analisar a capacidade do modelo em representar o comportamento de escoamentos viscoplásticos do tipo *dam-break*.

4.1 RESULTADOS DO CASO DE LIU (2018)

Os resultados da simulação do caso de Liu (2018) confirmam a adequação do modelo numérico empregado neste trabalho. A comparação entre a evolução temporal da frente de avanço (x_f) obtida numericamente (com a malha de 5 mm) é comparada com os dados numérico e experimentais reportado por Liu (2018), conforme Figura 7.

As três curvas apresentam boa concordância ao longo de praticamente todo o intervalo simulado. Em $t = 4,0\text{ s}$, por exemplo, a frente de escoamento obtida pela simulação numérica realizada neste trabalho (malha de 5 mm) atingiu 1,3610 m, frente aos 1,3040 m registrados experimentalmente por Liu (2018) e aos 1,3214 m obtidos pela simulação numérica do próprio autor. Esses valores correspondem a um erro relativo de 4,38% em relação ao dado experimental de Liu (2018) e de 3,00% em relação à simulação numérica reportada pelo mesmo autor.

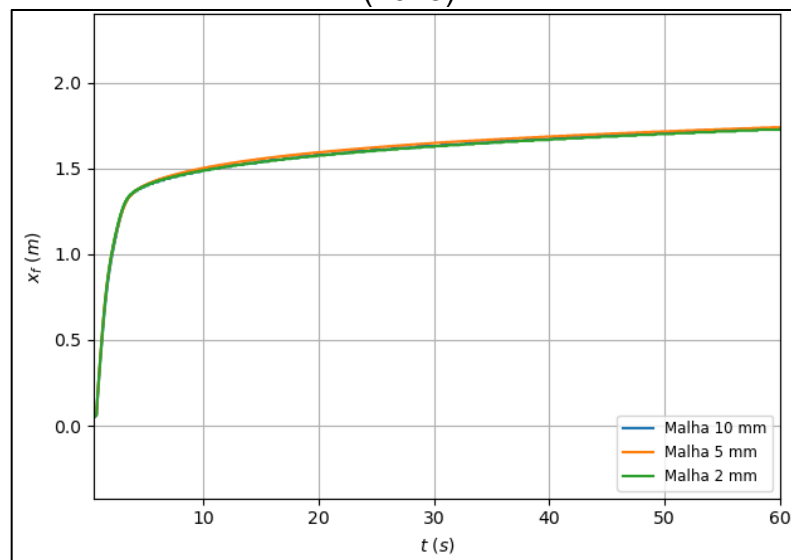
Figura 7 - Frente do escoamento: comparação entre simulação numérica (malha de 5 mm), resultado numérico e dados experimentais do artigo de Liu (2018)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

O estudo de sensibilidade de malha (Figura 8), avaliado pelo método do GCI, indicou erro de 0,014% entre as malhas mais finas (2 mm e 5 mm) e de 0,271% entre as malhas mais grosseiras (5 mm e 10 mm), indicando que a malha está adequada para a simulação.

Figura 8 - Frente do escoamento: estudo de sensibilidade de malha - caso de Liu (2018)

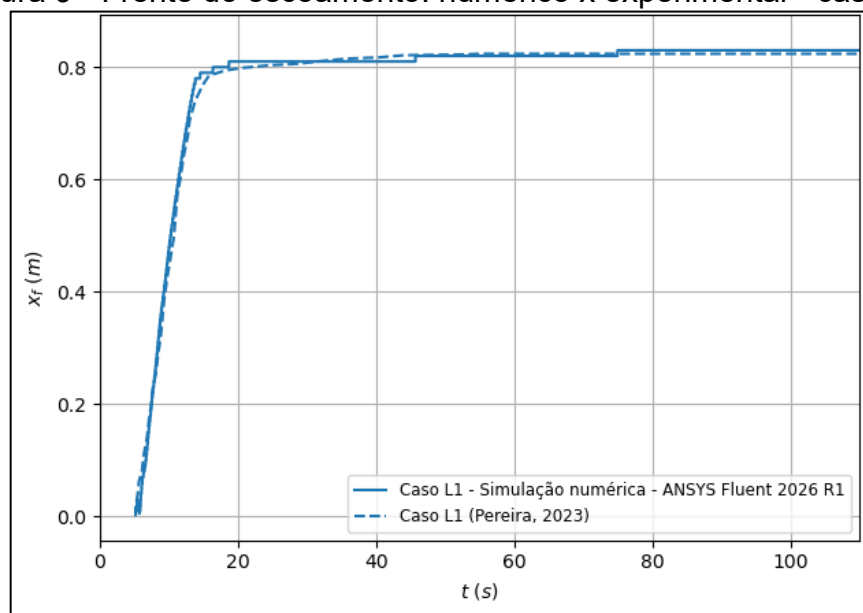


Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

4.2 RESULTADOS DA LAMA CAULÍNÍCA (L1 E L2)

Considerando os ensaios de *dam-break* com lama caulinítica reportados por Pereira (2023), o caso L1 apresentou excelente concordância entre os resultados numéricos e experimentais, com erro relativo de 1,97% no *runout* final, com o valor de frente de 0,840 m na simulação e de 0,824 m nos dados experimentais de Pereira (2023), e curvas de evolução temporal praticamente sobrepostas (Figura 9).

Figura 9 - Frente do escoamento: numérico x experimental - caso L1



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

A fim de complementar a análise quantitativa apresentada, a Figura 10 apresenta uma comparação qualitativa entre o registro fotográfico do ensaio experimental de Pereira (2023) e os contornos de fase obtidos na simulação numérica para o caso L1, evidenciando a semelhança na extensão e na geometria da frente de avanço da lama caulinítica.

O estudo de sensibilidade de malha para o caso L1 (Figura 11), considerando malhas de 15 mm, 10 mm e 5 mm, erro de 0,008% entre as malhas mais finas (5 mm e 10 mm) e de 0,324% entre as mais grosseiras (10 mm e 15 mm), indicando independência de malha satisfatória.

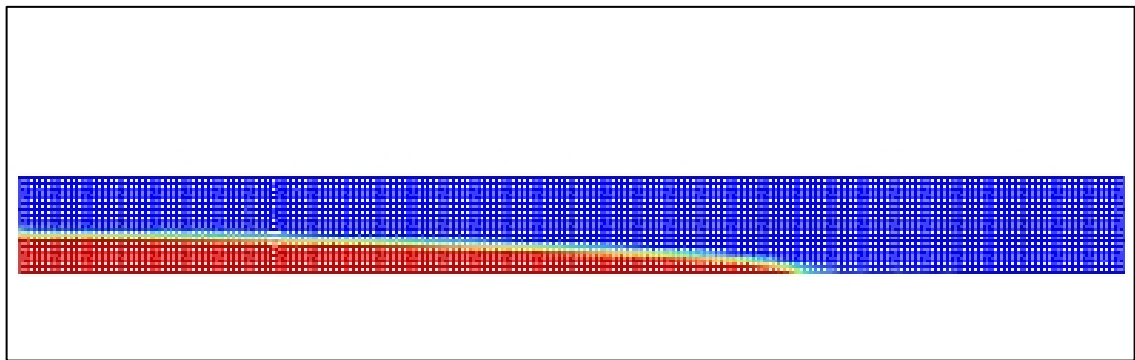
Figura 10 – Comparação entre o ensaio experimental e a simulação numérica para o caso L1

(a) *Ensaio experimental de Pereira (2023) em $t = 100\text{ s}$*



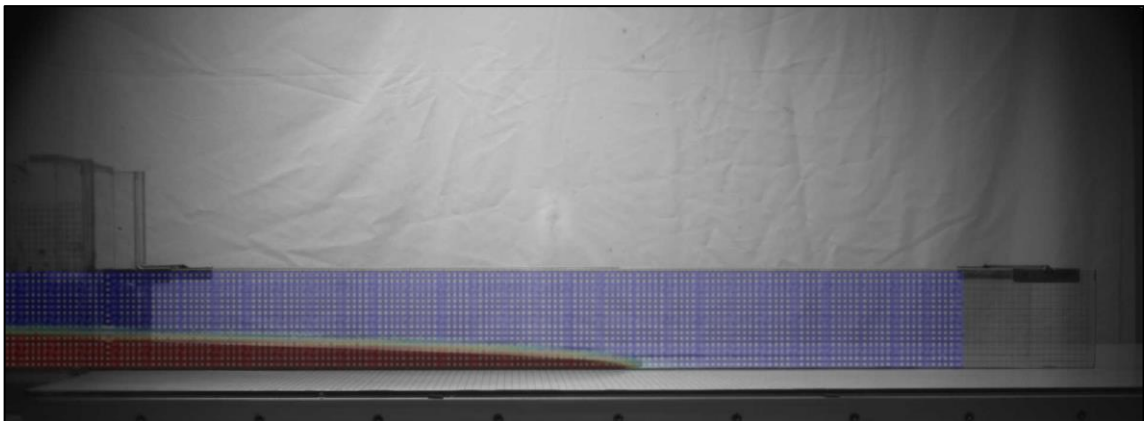
Fonte: Pereira (2023)

(b) *Contornos obtidos na simulação numérica no ANSYS Fluent 2026R1 em $t = 100\text{ s}$*



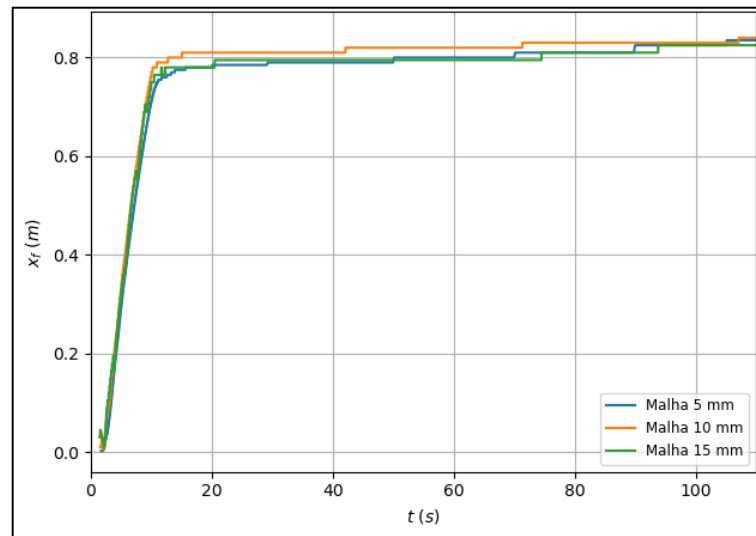
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

(c) *Sobreposição dos contornos numéricos sobre o registro fotográfico experimental em $t = 100\text{ s}$*



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

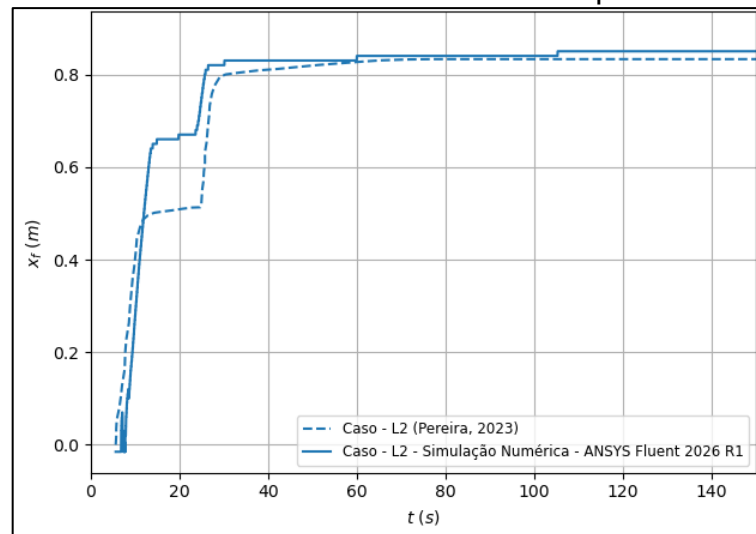
Figura 11 - Frente do escoamento: estudo de sensibilidade de malha - caso L1



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

O caso L2 apresentou erro relativo de 3,24% no *runout* final, com o valor de frente de 0,86 m na simulação e de 0,833 m nos dados experimentais (Figura 12).

Figura 12 - Frente do escoamento: numérico x experimental - caso L2



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

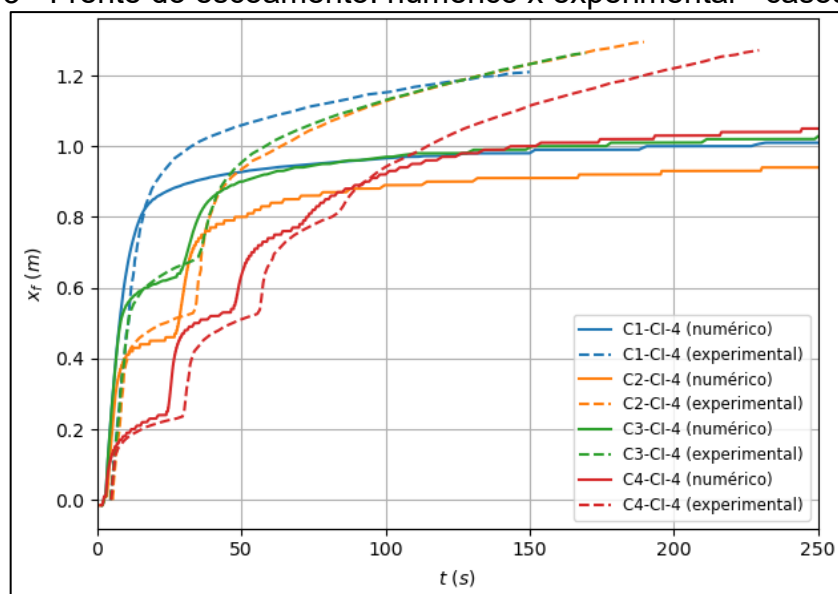
Observa-se, no entanto, um *delay* entre o instante em que o segundo estágio de abertura da comporta se reflete no avanço numérico e o instante em que esse mesmo efeito aparece na curva experimental: na simulação, governada pela UDF, a retomada do avanço ocorre de forma praticamente instantânea, ao passo que na curva experimental esse mesmo avanço se manifesta de forma mais gradual, com um

atraso concentrado entre $t \approx 20 \text{ s}$ e $t \approx 28 \text{ s}$. A origem dessa discrepância ainda não foi determinada. Uma possível explicação é que a movimentação da comporta durante o ensaio experimental de Pereira (2023) não tenha reproduzido exatamente a cinemática prescrita no modelo numérico, seja em razão de pequenas variações na velocidade de acionamento, do tempo efetivo de reinício do movimento entre os estágios ou de outras limitações inerentes ao sistema experimental. Entretanto, essa hipótese não pôde ser confirmada com os dados disponíveis.

4.3 RESULTADOS DOS GÉIS DE CARBOPOL (C1-C4)

Os resultados das simulações com géis de Carbopol (C1-CI-4 a C4-CI-4) apresentam boa concordância com os dados experimentais durante a fase ativa de abertura da comporta (fase inercial), incluindo, nos casos com múltiplos estágios (C2-CI-4, C3-CI-4 e C4-CI-4), o instante e a magnitude dos avanços associados a cada novo estágio de abertura (Figura 13). A divergência sistemática observada concentra-se na fase posterior, de escoamento lento (*creeping*): em todos os quatro casos, a curva numérica tende a um platô poucos segundos após o fim da abertura da comporta, enquanto a curva experimental continua avançando gradualmente até o final do ensaio.

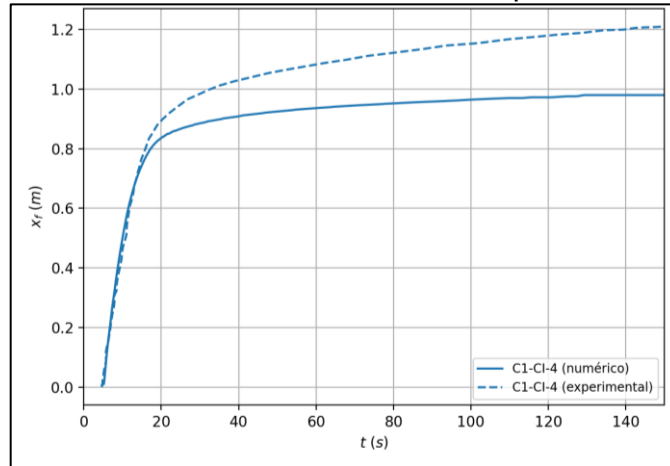
Figura 13 - Frente do escoamento: numérico x experimental - casos C1 a C4



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Para melhor visualização e comparação individual dos resultados, cada caso é apresentado isoladamente nas Figuras 14, 16, 17 e 18.

Figura 14 - Frente do escoamento: numérico x experimental - caso C1-CI-4



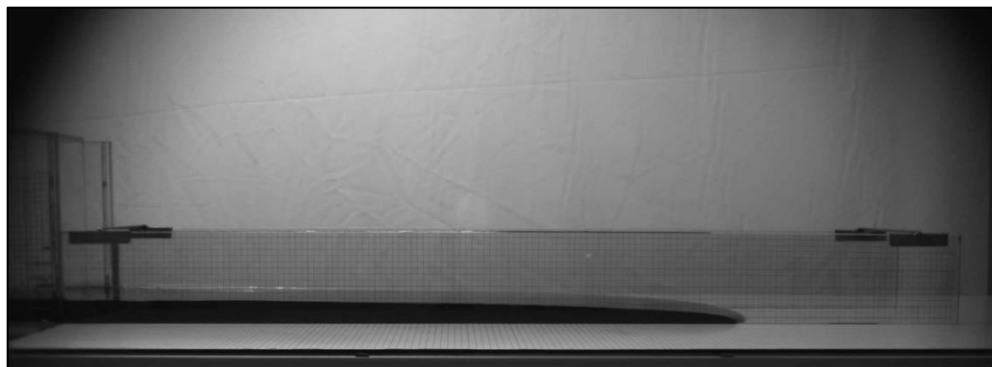
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Para o caso C1-CI-4, o *runout* final experimental foi de 1,21 m e o numérico de 0,98 m, resultando em erro de 19,01%.

De forma análoga, a Figura 15 apresenta a comparação qualitativa entre o ensaio experimental de Pereira (2023) e os contornos de fase obtidos na simulação numérica para o caso C1-CI-4, permitindo observar a divergência na geometria da frente de avanço do gel de Carbopol.

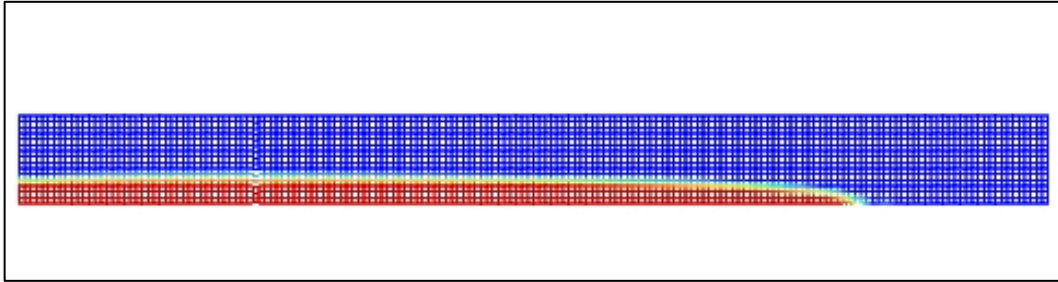
Figura 15 – Comparação entre o ensaio experimental e a simulação numérica para o caso C1-CI-4

(a) Ensaio experimental de Pereira (2023) em $t = 100\text{ s}$



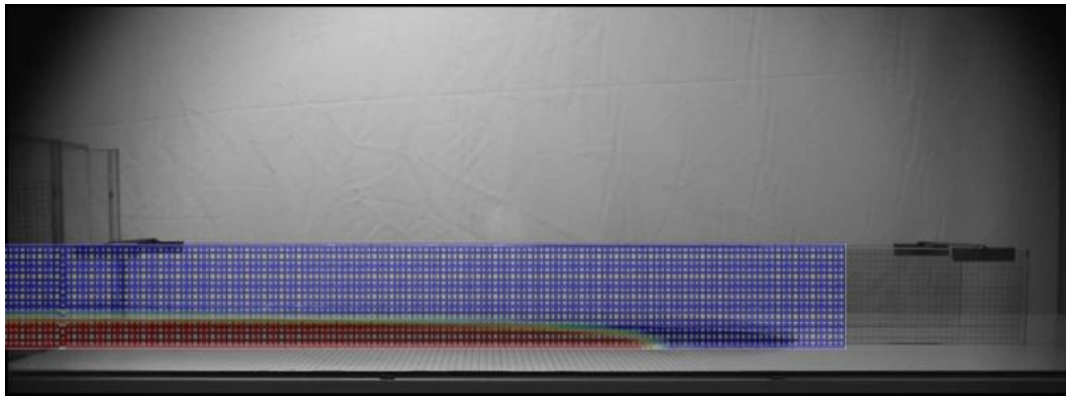
Fonte: Pereira (2023)

(b) Contornos obtidos na simulação numérica no ANSYS Fluent 2026R1 em $t = 100\text{ s}$



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

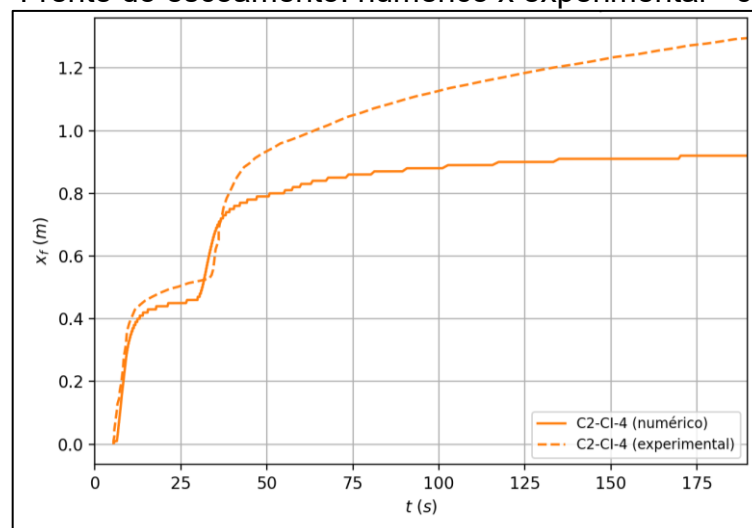
(c) Sobreposição dos contornos numéricos sobre o registro fotográfico experimental em $t = 100\text{ s}$, evidenciando a divergência entre as frentes numérica e experimental



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Para o caso C2-CI-4, o *runout* final experimental foi de $1,29\text{ m}$ e o numérico de $0,92\text{ m}$, resultando em erro de 28,95%.

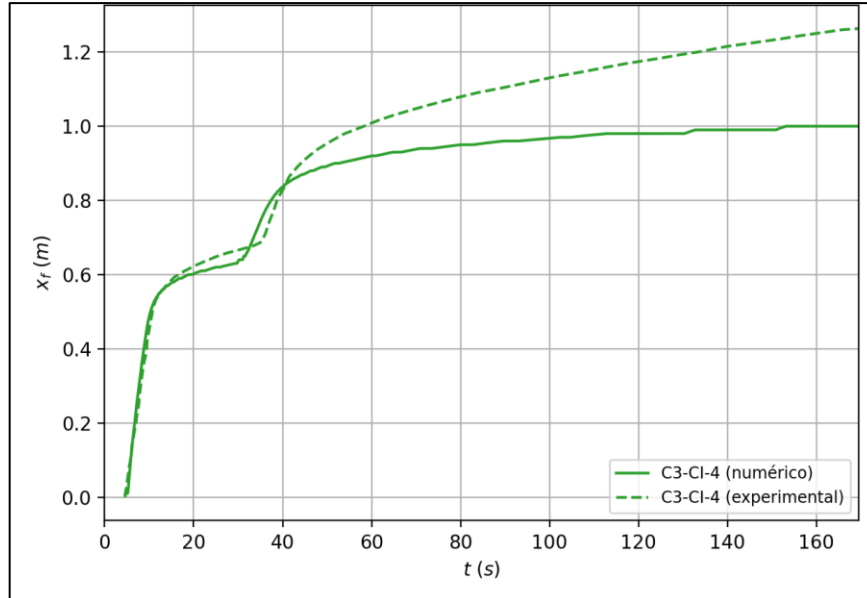
Figura 16 - Frente do escoamento: numérico x experimental - caso C2-CI-4



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Para o caso C3-CI-4, o *runout* final experimental foi de 1,26 m e o numérico de 1,00 m, resultando em erro de 20,84%.

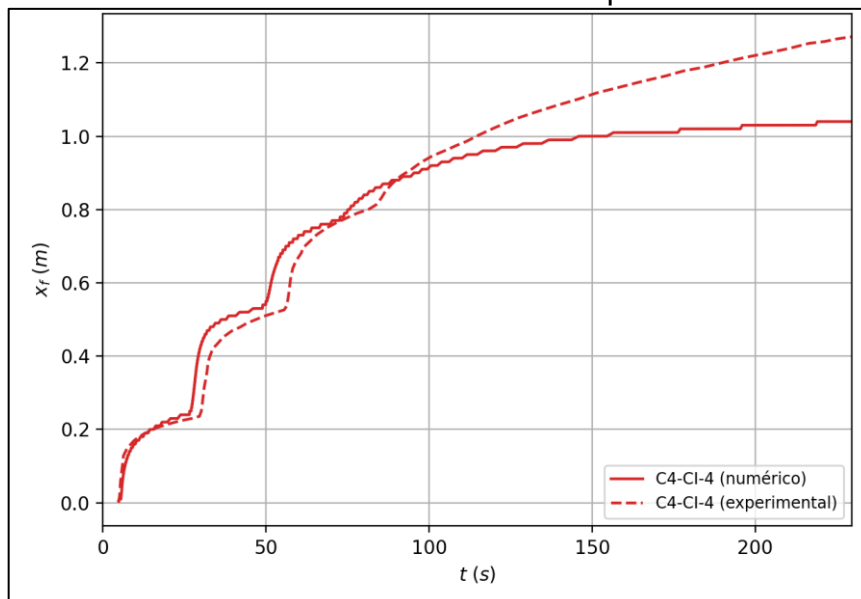
Figura 17 - Frente do escoamento: numérico x experimental - caso C3-CI-4



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Para o caso C4-CI-4, o *runout* final experimental foi de 1,27 m e o numérico de 1,04 m, resultando em erro de 18,19%.

Figura 18 - Frente do escoamento: numérico x experimental - caso C4-CI-4



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

De forma geral, considerando os resultados de géis de carbopol, observa-se que o modelo numérico reproduz satisfatoriamente a fase inicial e intermediária do escoamento, caracterizada pelo predomínio dos efeitos inerciais, apresentando elevada concordância com os dados experimentais. Entretanto, as discrepâncias tornam-se mais evidentes na fase final, quando a velocidade do escoamento diminui e o *runout* passa a ser controlado pelo equilíbrio entre a força gravitacional e a tensão limite de escoamento do fluido. Nessa condição, diferenças entre o modelo numérico e o comportamento físico do material tendem a produzir efeitos acumulativos sobre a posição final da frente. Experimentalmente, uma possível explicação é a ocorrência de deslizamento na interface fluido-parede, fenômeno frequentemente reportado para géis de Carbopol e não considerado nas simulações, nas quais foi adotada a condição de não deslizamento. Do ponto de vista numérico, a discrepância também pode estar relacionada à regularização da viscosidade aparente em baixas taxas de deformação, às limitações inerentes ao método VOF na representação da interface durante longos tempos de simulação, às incertezas dos parâmetros reológicos empregados e aos erros de discretização espacial e temporal, cuja influência tende a ser mais pronunciada na proximidade da parada do escoamento.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo desenvolver e validar um modelo numérico, implementado em ANSYS Fluent, para a simulação de escoamentos viscoplásticos do tipo *dam-break* com abertura controlada de comporta por meio de malha dinâmica, confrontando os resultados numéricos com dados experimentais e de referências da literatura. De forma geral, os objetivos específicos propostos foram alcançados: o modelo reológico de Herschel-Bulkley com regularização numérica foi implementado e aplicado de forma consistente a três conjuntos de casos.

O caso de Liu (2018) serviu como principal referência de validação do modelo: a comparação com os dados digitalizados do artigo original resultou em erro relativo de 4,38%, e o estudo de independência de malha, avaliado pelo GCI, indicou ordem de convergência $p = 3,25$ e faixa assintótica de 1,002 (diferença de apenas 0,014% entre as malhas mais finas e 0,271% entre as mais grosseiras), valor muito próximo

do ideal. Esses resultados confirmam a adequação da discretização espacial empregada nas demais simulações deste trabalho.

Nos casos com lama caulínica de Pereira (2023), o caso L1 apresentou excelente concordância com o experimento (erro de 1,97% no *runout* final), reforçando a validade do modelo para esse fluido-teste. O caso L2 apresentou erro semelhante no *runout* final (3,24%), porém com um trecho de divergência na curva experimental cuja origem ainda não foi determinada, possivelmente associada à resolução temporal da medição.

Já os casos com géis de Carbopol (C1-CI-4 a C4-CI-4) revelaram um padrão sistemático e até então não completamente explicado: boa concordância numérico-experimental durante a fase ativa de abertura da comporta, incluindo nos casos com múltiplos estágios de abertura, seguida de divergência crescente na fase de escoamento com erro no *runout* final variando entre 18,19% e 28,95%.

Além das contribuições relacionadas ao desenvolvimento e à validação do modelo numérico, este trabalho resultou na elaboração de um tutorial detalhado de configuração e execução das simulações no ANSYS Fluent, com o objetivo de facilitar a reprodução da metodologia empregada e servir como material de apoio para futuras pesquisas na área.

Por fim, como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se: (i) investigar de forma sistemática a sensibilidade dos resultados de Carbopol ao parâmetro de regularização da viscosidade aparente, comparando-se diferentes formulações de regularização; (ii) avaliar a influência da velocidade e do número de estágios de abertura da comporta sobre a divergência observada na fase de escoamento lento; e (iii) estender a validação a outros conjuntos de dados experimentais disponíveis na literatura, de modo a consolidar a aplicabilidade do modelo numérico desenvolvido a escoamentos viscoplásticos do tipo *dam-break*.

REFERÊNCIAS

- ANCEY, C. Plasticity and geophysical flows: A review. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 142, p. 4–35, 2007.
- ANCEY, C.; ANDREINI, N.; EPELY-CHAUVIN, G. Viscoplastic dam-break waves: Review of simple computational approaches and comparison with experiments. **Advances in Water Resources**, v. 48, p. 79–91, 2012.
- ANCEY, C.; COCHARD, S. The dam-break problem for Herschel–Bulkley viscoplastic fluids down steep flumes. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 158, p. 18–35, 2009.
- CELIK, I. B. et al. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. **Journal of Fluids Engineering**, v. 130, n. 7, p. 078001, 2008.
- COUSSOT, P. Rheophysics. **Matter in all its states, Paris-Est: Springer**, 2014.
- COUSSOT, P. **Mudflow rheology and dynamics**. London: Routledge, 2017.
- FRIGAARD, I. A.; NOUAR, C. On the usage of viscosity regularisation methods for viscoplastic fluid flow computation. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 127, n. 1, p. 1–26, 2005.
- GAO, J.; FOURIE, A. Spread is better: An investigation of the mini-slump test. **Minerals Engineering**, v. 71, p. 120–132, 2015.
- JEYAPALAN, J. K.; DUNCAN, J. M.; SEED, H. B. Analyses of flow failures of mine tailings dams. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 109, p. 150–171, 1983.
- LIU, H. **An experimental and numerical study of runout from a tailings dam failure**. 2018. 236 f. Tese (Doutorado) – The University of Western Australia, Perth, 2018.
- MOUKALLED, F.; MANGANI, L.; DARWISH, M. **The finite volume method in computational fluid dynamics**. New York: Springer, 2016.

PEREIRA, J. B. **Velocimetria e avanço de frentes de escoamento de fluido viscoplástico em canal e plano inclinado**. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2023.

PEREIRA, J.; MACIEL, G. Automated slump test: An effective alternative in predicting rheological properties and an efficient tool for providing the quality control of materials. **Measurement**, v. 178, p. 109384, 2021.

PIRULLI, M. et al. The failure of the Stava Valley tailings dams (Northern Italy): numerical analysis of the flow dynamics and rheological properties. **Geoenvironmental Disasters**, v. 4, n. 1, 2017.

ROUSSEL, N.; COUSSOT, P. Fifty-cent rheometer for yield stress measurements: From slump to spreading flow. **Journal of Rheology**, v. 49, n. 3, p. 705–718, 2005.

SÁO, Yuri Taglieri. Investigação numérico-experimental da influência de efeitos de inércia em escoamentos de fluidos viscoplásticos modelados como ruptura de barragem. 2021. Dissertação (Mestrado) -- Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2021.

APÊNDICE A – MANUAL PARA SIMULAÇÃO DE *DAM-BREAK* NÃO NEWTONIANO COM COMPORTA DESCENDENTE NO ANSYS FLUENT

A.1 Introdução

Este apêndice apresenta um guia detalhado para a configuração e execução de uma simulação numérica de ruptura de barragem (*dam break*) com abertura de comporta utilizando o software ANSYS Fluent. O objetivo é documentar as etapas necessárias para a reprodução do caso de estudo adotado neste trabalho, abrangendo desde a construção da geometria e geração da malha computacional até a definição dos modelos físicos, execução da simulação e análise dos resultados obtidos.

Como caso de referência, foi selecionado o experimento apresentado por Liu (2018), utilizado ao longo deste trabalho para validação da metodologia numérica empregada. O esquema para a simulação está apresentado na Figura 3 e os dados de entrada nas Tabelas 1 e 2 (já apresentados na metodologia do trabalho).

Figura 3 - Esquema em corte longitudinal do canal - caso de Liu (2018)

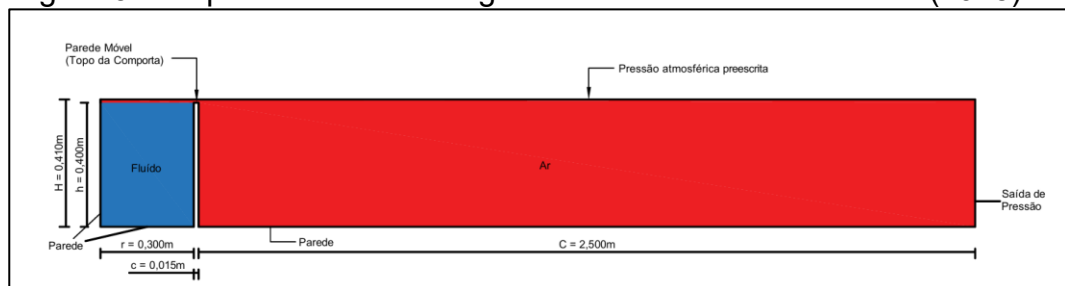


Tabela 1 - Parâmetros reológicos do caso de Liu (2018)

Ensaio	τ_0 (Pa)	K (Pa · s ⁿ)	n	ρ (kg/m ³)
Liu (2018)	4,40	25,50	0,37	1000,00

Fonte: Liu (2018)

Tabela 2 - Configuração operacional do caso de Liu (2018)

Ensaio	Fluido-teste	Inclinação (°)	Velocidade comporta (m/s)	Posição da comporta (mm)*
Liu (2018)	Carbopol 940 0,14%	0 (horizontal)	0,16	400 - 0

*posição inicial - posição final (abertura única).

Fonte: Liu (2018)

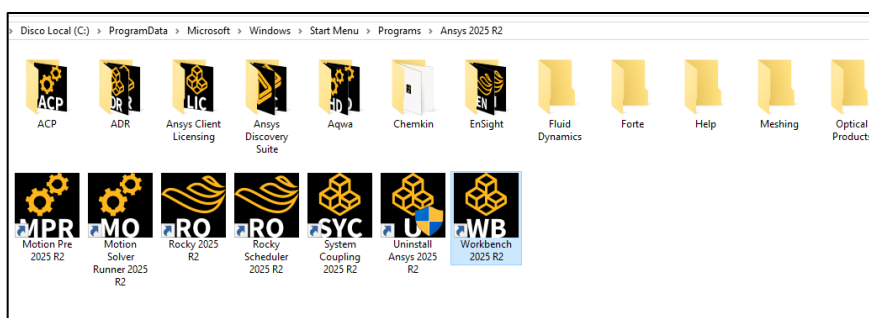
As etapas descritas a seguir foram organizadas de forma sequencial e ilustrada, buscando facilitar a reprodução da metodologia por estudantes, pesquisadores e profissionais interessados na área. O procedimento foi elaborado com caráter didático, assumindo conhecimento prévio mínimo do software, de modo que o usuário possa reproduzir integralmente a simulação seguindo as instruções apresentadas.

A.2 Inicialização do ANSYS Workbench

O primeiro passo para a realização da simulação consiste na abertura do software ANSYS Workbench, ambiente responsável pela organização e integração de todas as etapas do processo numérico. Inicialmente, utiliza-se o Workbench para estruturar o projeto e gerenciar o fluxo de trabalho da simulação.

Após a instalação do ANSYS, o Workbench pode ser acessado pelo menu de programas do sistema operacional, conforme apresentado na Figura A.1. Ao ser executado, o software apresenta uma interface contendo diversos módulos de análise, cada um destinado a aplicações específicas de engenharia.

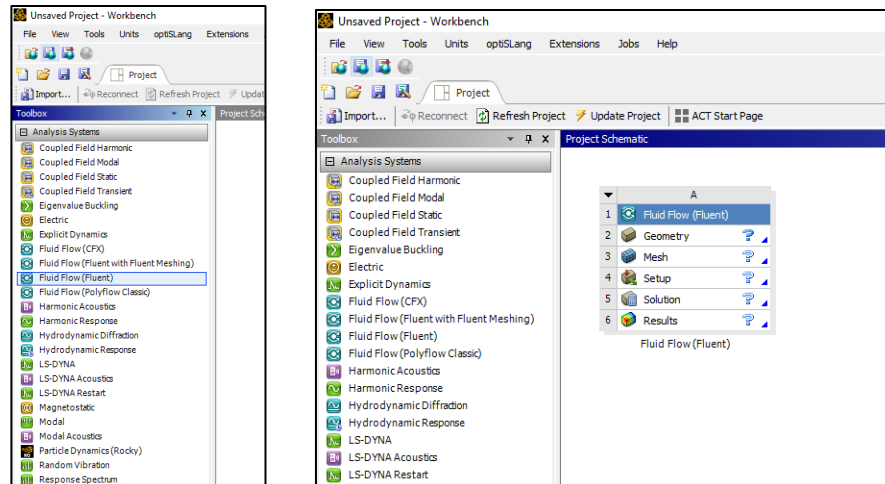
Figura A.1 – Localização do ANSYS Workbench no menu de programas do Windows.



Para simulações de dinâmica dos fluidos computacional (CFD), deve-se selecionar o módulo *Fluid Flow (Fluent)*, localizado na seção *Analysis Systems*, conforme destacado na Figura A.2. Após a inserção do módulo na área de projeto (*Project Schematic*), o Workbench cria automaticamente uma sequência de etapas interligadas. Essas etapas correspondem à construção da geometria (*Geometry*), geração da malha computacional (*Mesh*), configuração dos modelos físicos e

parâmetros numéricos (*Setup*), execução do cálculo (*Solution*) e pós-processamento dos resultados (*Results*).

Figura A.2 – Seleção do módulo *Fluid Flow (Fluent)* na seção *Analysis Systems* e estrutura do sistema de análise criada após sua inserção na área de projeto.

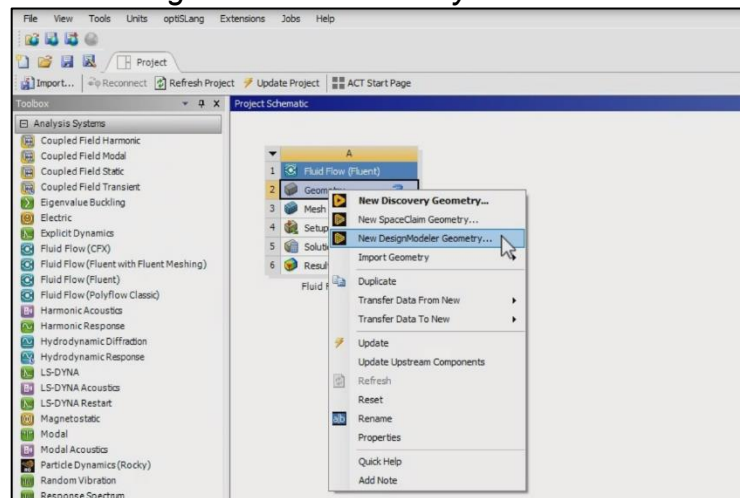


(a) Seleção do módulo *Fluid Flow (Fluent)*. (b) Estrutura do sistema de análise criada pelo Workbench.

A.3 Construção da Geometria

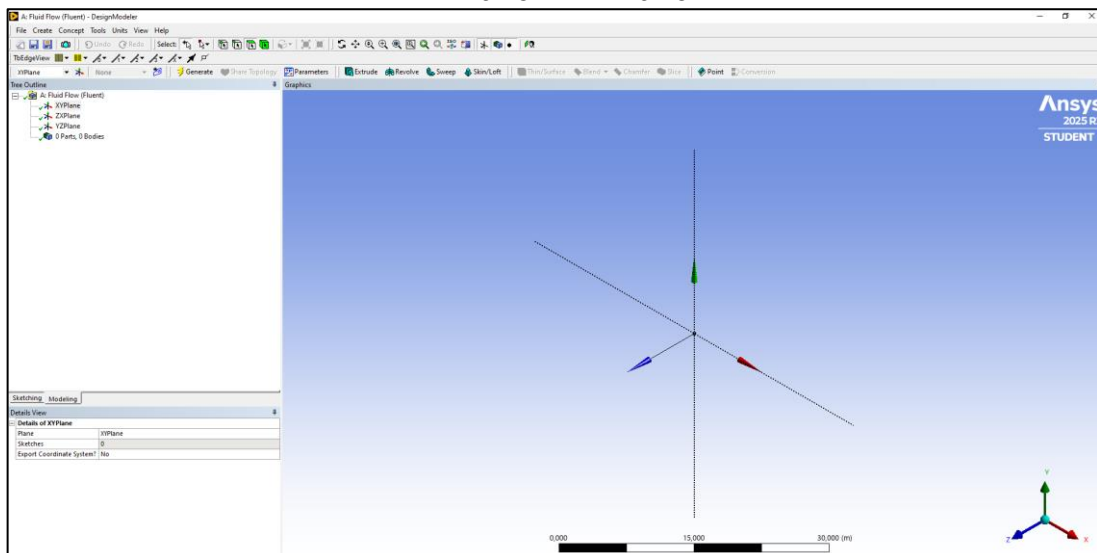
A geometria do domínio computacional pode ser construída tanto no *SpaceClaim* quanto no *DesignModeler*, ambos acessíveis a partir da célula *Geometry* do projeto criado no *Workbench*. Neste trabalho, optou-se por utilizar o *DesignModeler*, por se tratar de uma ferramenta computacionalmente mais leve, adequada à geometria bidimensional simples requerida pelo problema de ruptura de barragem. Para abri-lo, clica-se com o botão direito sobre a célula *Geometry* e seleciona-se a opção *New DesignModeler Geometry...*, conforme indicado na Figura A.3.

Figura A.3 – Menu de contexto da célula *Geometry*, com a opção *New DesignModeler Geometry* selecionada.



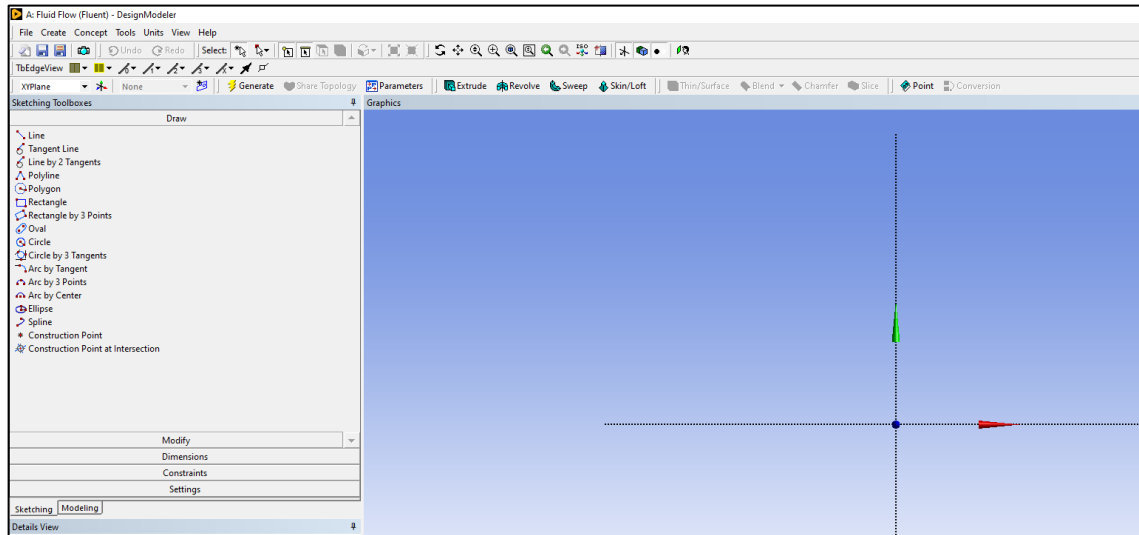
Ao ser aberto, o *DesignModeler* apresenta a tela inicial exibida na Figura A.4, na qual constam, na árvore do projeto (*Tree Outline*), os três planos de referência padrão do software: *XYPlane*, *ZXPlane* e *YZPlane*. Como o problema estudado é bidimensional, adota-se o plano *XYPlane* como base para a construção do rascunho (*sketch*) da geometria.

Figura A.4 – Tela inicial do *DesignModeler*, com os planos de referência *XYPlane*, *ZXPlane* e *YZPlane*.



Para iniciar o desenho, seleciona-se a aba *Sketching*, na qual é exibida a paleta de ferramentas de desenho (*Draw*), apresentada na Figura A.5, com comandos para a criação de linhas, retângulos, círculos e demais formas geométricas necessárias à construção do domínio.

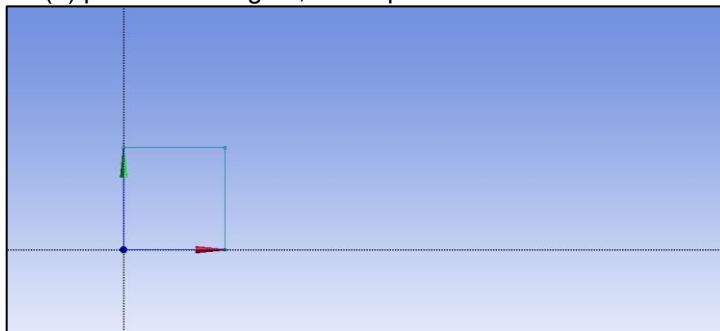
Figura A.5 – Aba *Sketching*, com a paleta de ferramentas de desenho (*Draw*) exibida.



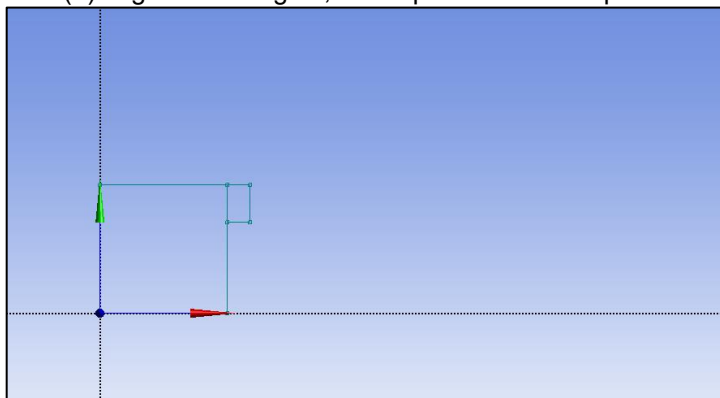
O domínio computacional pode ser representado de diversas formas; neste trabalho, optou-se pela construção de três retângulos independentes, dispostos lado a lado, representando, respectivamente, o reservatório, a comporta e o canal. A Figura A.6 apresenta a construção progressiva do rascunho: em (a), o primeiro retângulo, correspondente ao reservatório; em (b), o segundo retângulo, de menores dimensões, correspondente à comporta; e, em (c), o terceiro e último retângulo, de maior extensão, correspondente ao canal.

Figura A.6 – Construção progressiva do rascunho dos três retângulos do domínio.

(a) primeiro retângulo, correspondente ao reservatório.



(b) segundo retângulo, correspondente à comporta.



(c) terceiro retângulo, correspondente ao canal, completando o desenho.



Com os três retângulos esboçados, é necessário definir suas dimensões. Para isso, acessa-se a aba *Dimensions*, na qual estão disponíveis opções como *General*, *Horizontal*, *Vertical* e *Length/Distance*, entre outras, como ilustra a Figura A.7. Ao selecionar a opção *General* e clicar sobre as arestas do desenho, são geradas cotas (H1, H2, H3, V4 e V7) inicialmente com valores definidos pelo esboço já criado, conforme ilustrado na Figura A.8.

Figura A.7 – Aba *Dimensions*, com as opções disponíveis para a aplicação de cotas ao desenho.

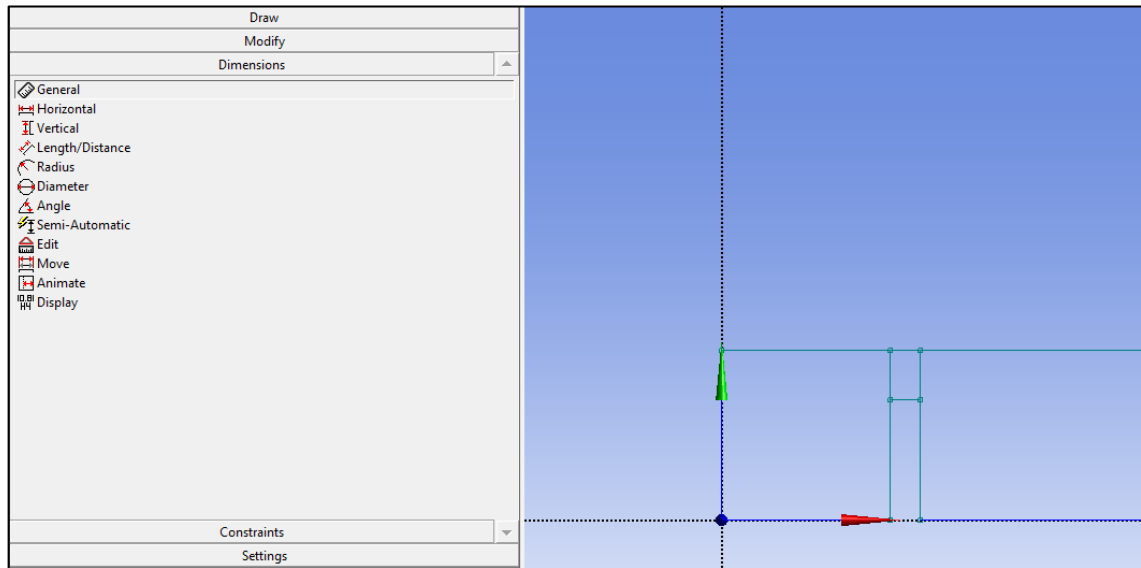
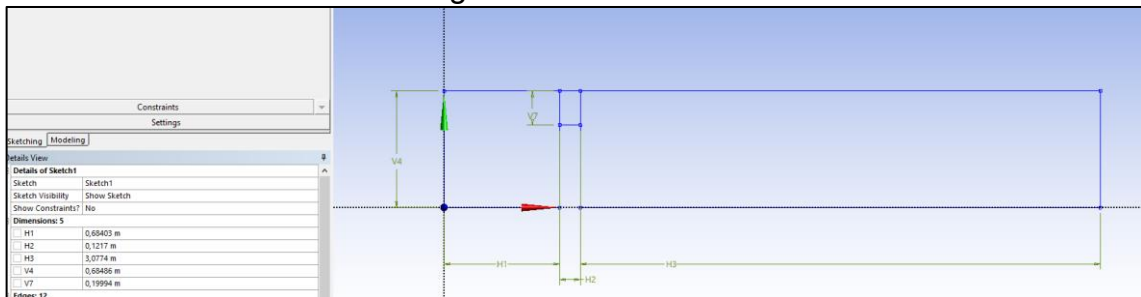
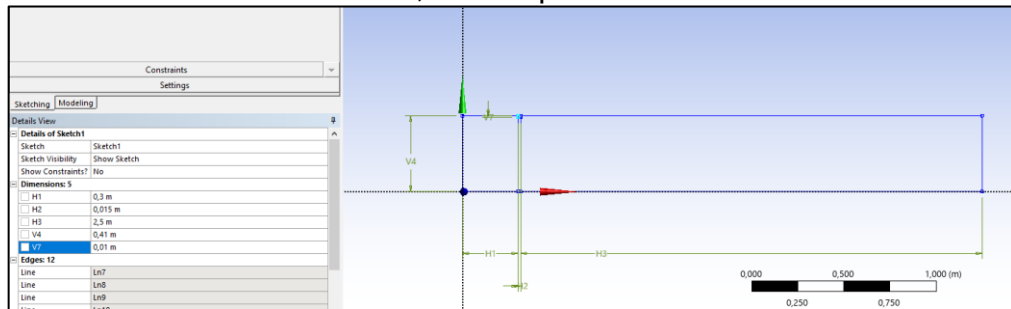


Figura A.8 – Cotas (H1, H2, H3, V4 e V7) aplicadas ao desenho, com valores genéricos iniciais.



Em seguida, os valores reais das dimensões do reservatório, da comporta e do canal são atribuídos a cada uma das cotas, no painel *Details View*. A Figura A.9 apresenta o rascunho com as dimensões finais aplicadas ($H1 = 0,3\text{ m}$; $H2 = 0,015\text{ m}$; $H3 = 2,5\text{ m}$; $V4 = 0,41\text{ m}$; $V7 = 0,01\text{ m}$), conforme estabelecido na metodologia adotada para o caso simulado.

Figura A.9 – Rascunho com as dimensões finais aplicadas às arestas do reservatório, da comporta e do canal.



Com o rascunho devidamente dimensionado, o próximo passo consiste em transformá-lo em uma superfície. Para isso, acessa-se o menu *Concept* e seleciona-se a opção *Surfaces From Sketches*, como indicado na Figura A.10. Ao aplicar o comando, é exibido o painel de detalhes da superfície criada (*SurfaceSk1*), no qual o campo *Operation* aparece, por padrão, configurado como *Add Material*, conforme ilustra a Figura A.11.

Figura A.10 – Seleção da opção *Surfaces From Sketches* no menu *Concept*.

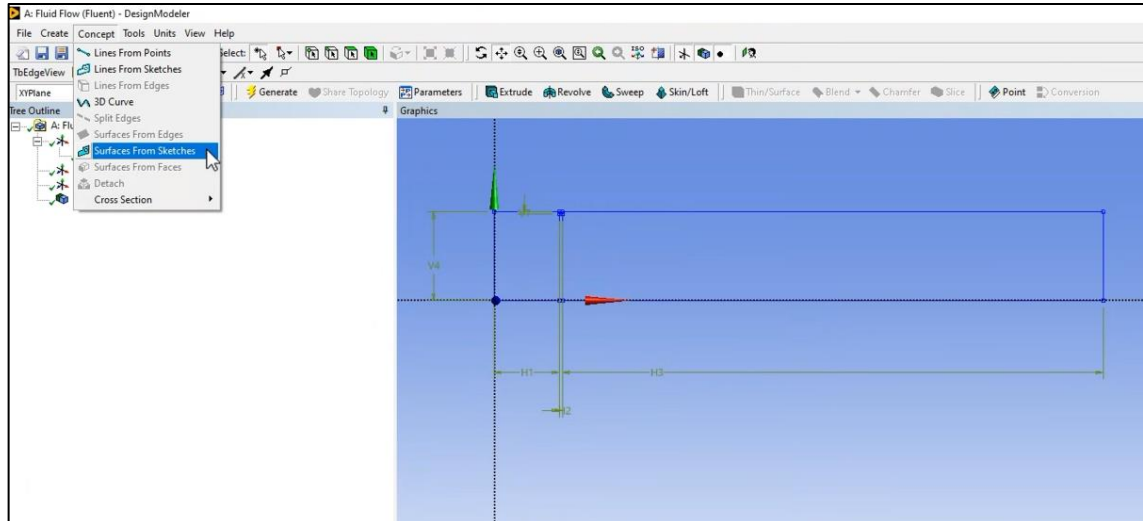
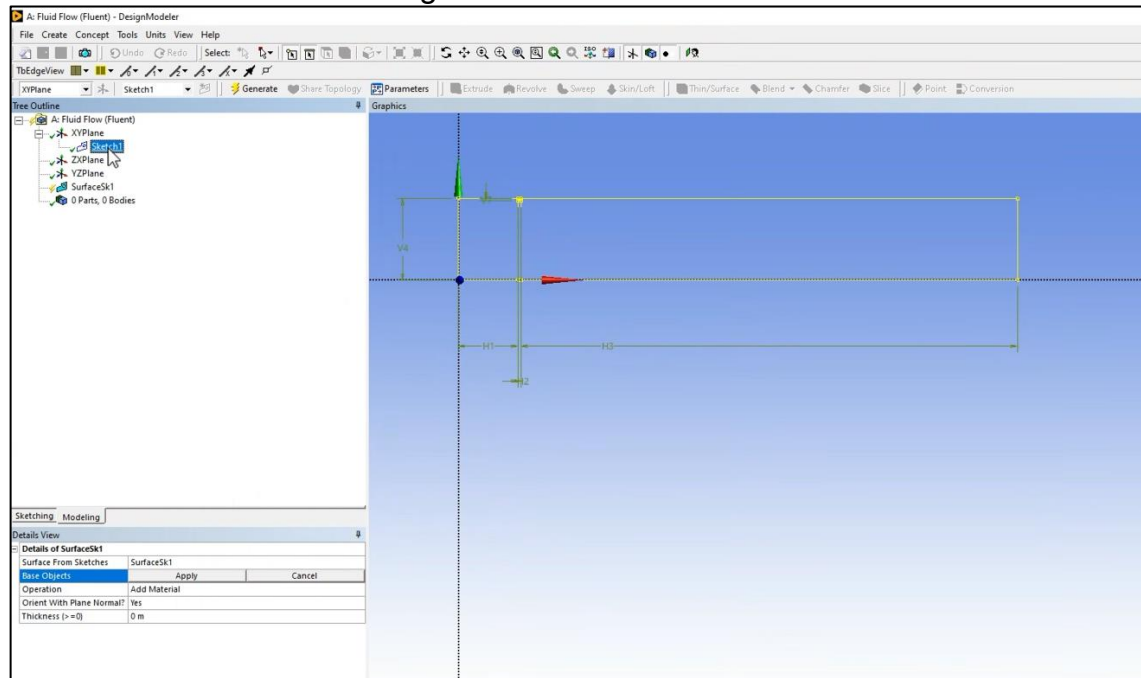
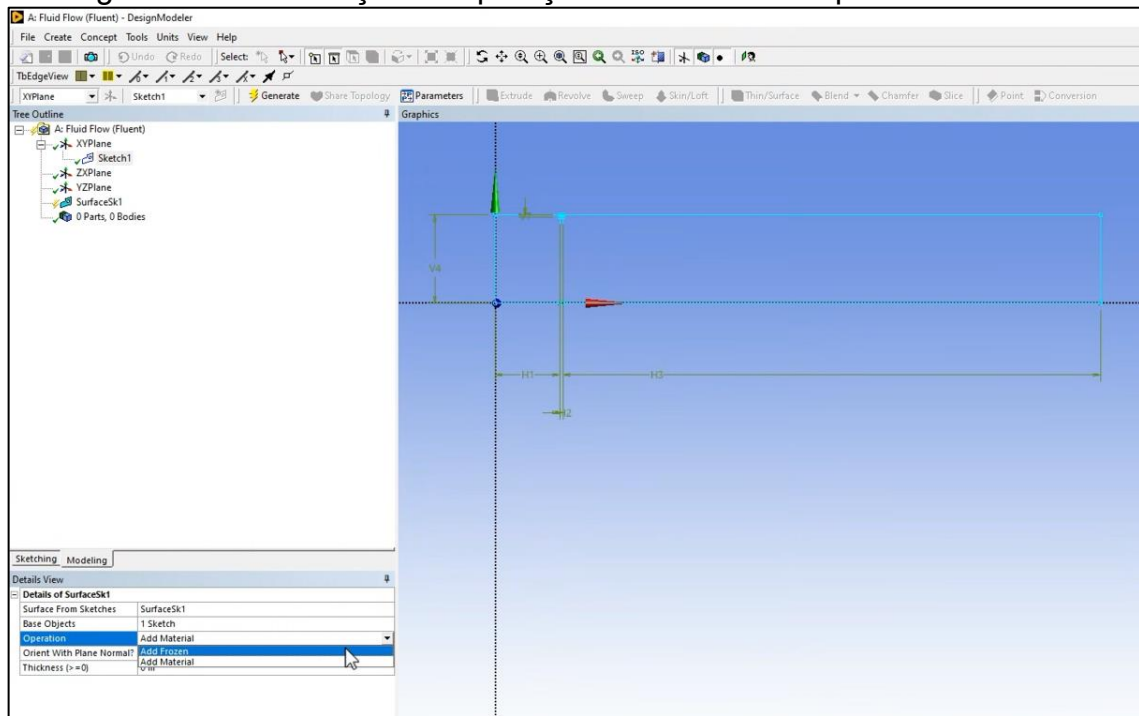


Figura A.11 – Painel de detalhes da superfície criada (*SurfaceSk1*), com a operação configurada como *Add Material*.



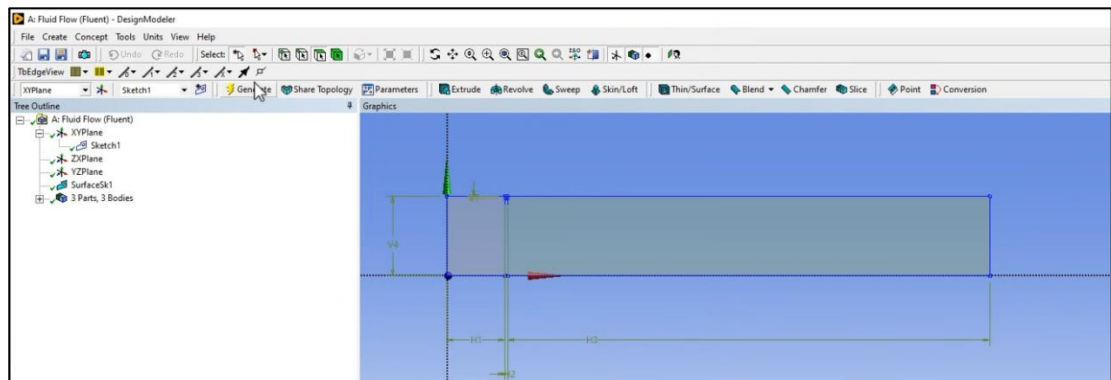
É fundamental alterar essa configuração para *Add Frozen*, como indicado na Figura A.12. Isso porque, ao manter a opção *Add Material*, o *Workbench* tenta unir as três superfícies sobrepostas em um único corpo sólido contínuo, o que resulta em erro na geração da geometria, uma vez que o reservatório, a comporta e o canal devem permanecer como corpos independentes entre si.

Figura A.12 – Alteração da operação de *Add Material* para *Add Frozen*.



Após a alteração da operação e a confirmação do comando *Generate*, a superfície é criada com sucesso, sendo automaticamente dividida em três partes independentes, identificadas na árvore do projeto como *3 Parts, 3 Bodies*, conforme ilustrado na Figura A.13. Cada uma dessas partes corresponde a um dos três retângulos originalmente esboçados.

Figura A.13 – Superfície gerada, dividida em três partes independentes (*3 Parts, 3 Bodies*).



Como etapa final da construção da geometria, cada um dos três corpos pode ser renomeado de acordo com sua função no domínio computacional. Selecionando-se individualmente cada *Surface Body* na árvore do projeto, é possível identificá-lo na janela gráfica (*Graphics*) e atribuir-lhe um nome representativo. As Figuras A.14, A.15 e A.16 ilustram, respectivamente, a seleção do corpo correspondente ao reservatório, à comporta e ao canal.

Figura A.14 – Seleção do *Surface Body* correspondente ao reservatório.

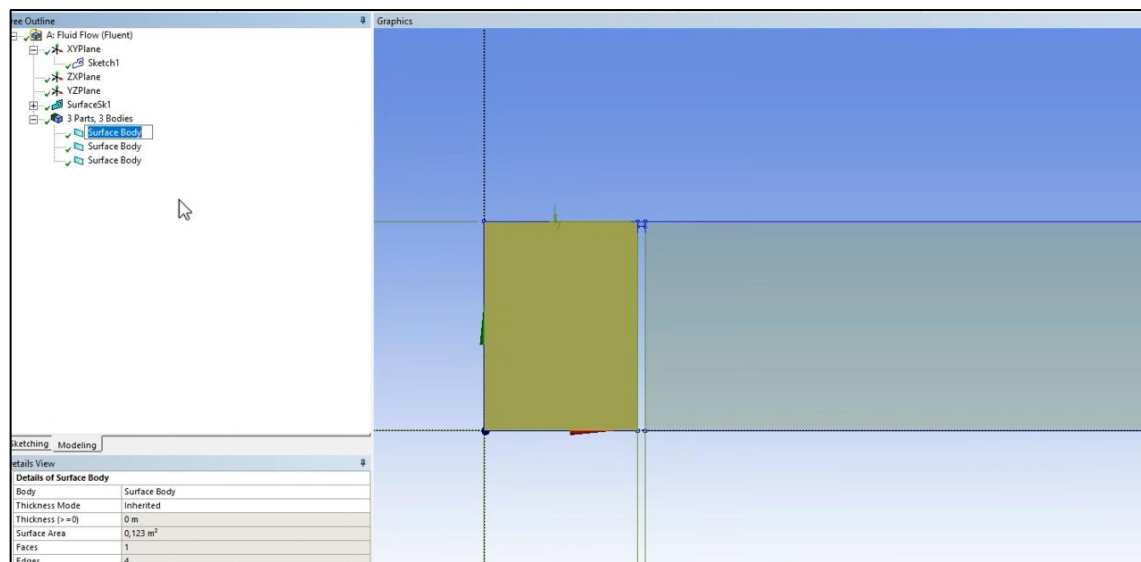


Figura A.15 – Seleção do *Surface Body* correspondente à comporta.

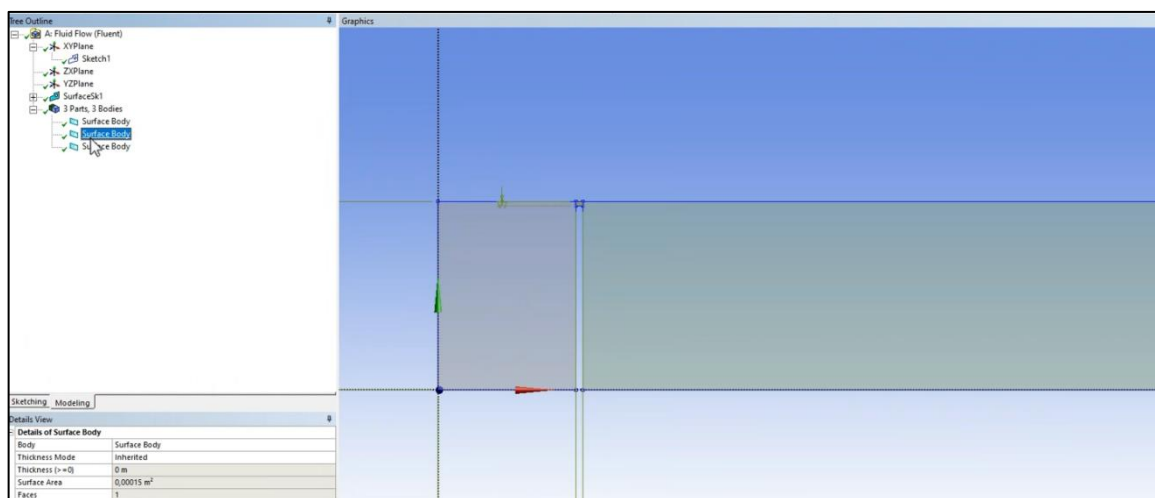
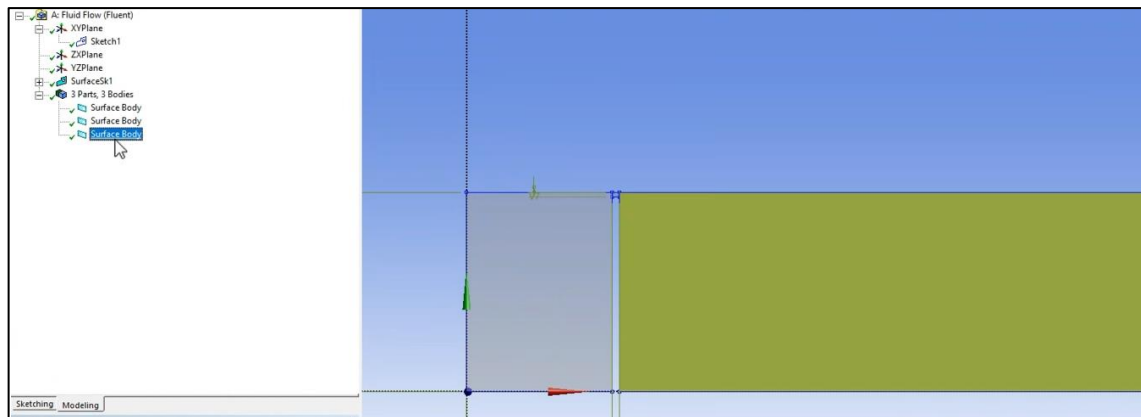
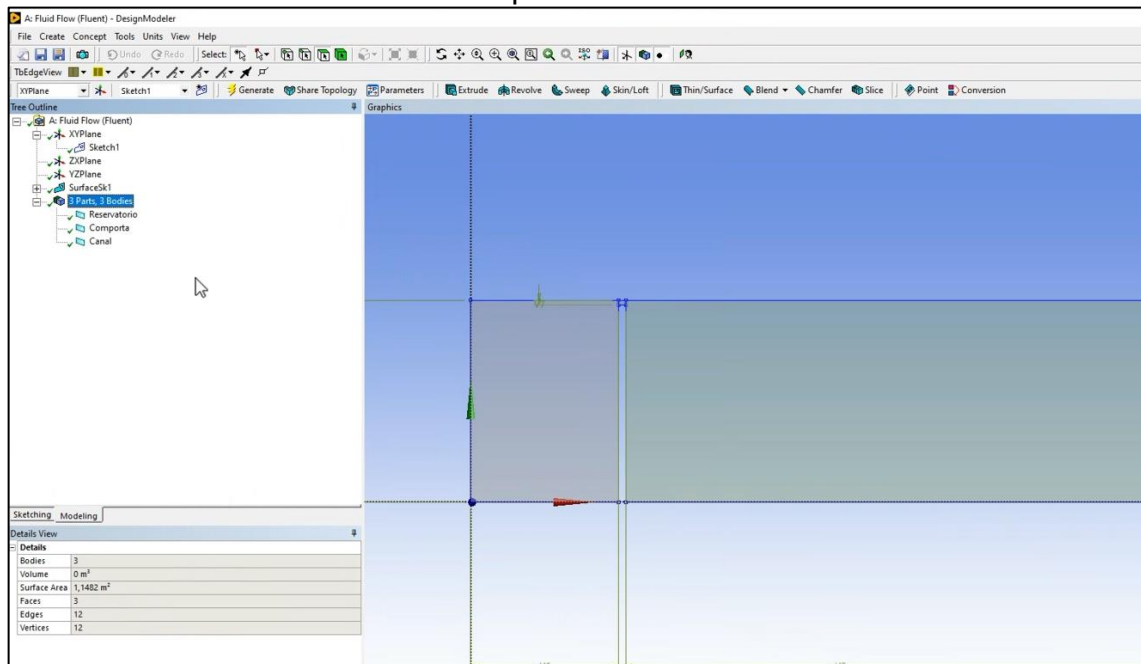


Figura A.16 – Seleção do *Surface Body* correspondente ao canal.



Ao final do processo, a árvore do projeto exibe os três corpos devidamente renomeados como Reservatório, Comporta e Canal, como apresentado na Figura A.17. Com a geometria finalizada, encerra-se esta etapa, sendo possível avançar para a construção da malha computacional.

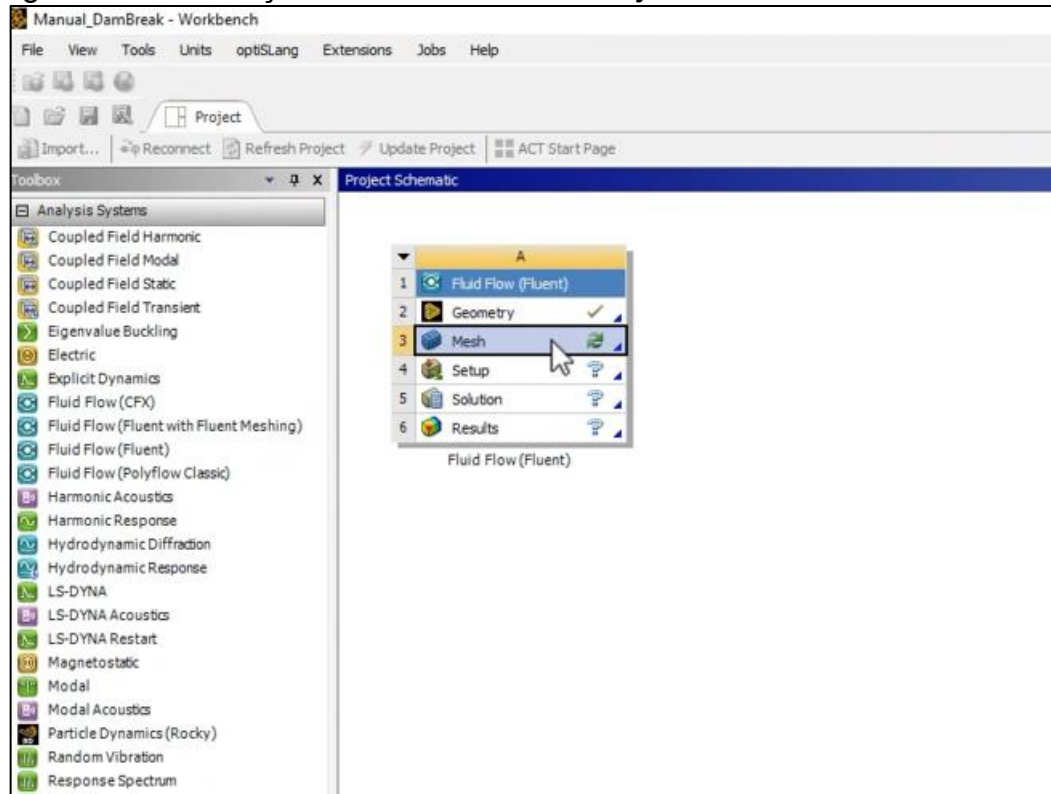
Figura A.17 – Árvore do projeto com os três corpos renomeados: Reservatório, Comporta e Canal.



A.4 Geração da Malha Computacional

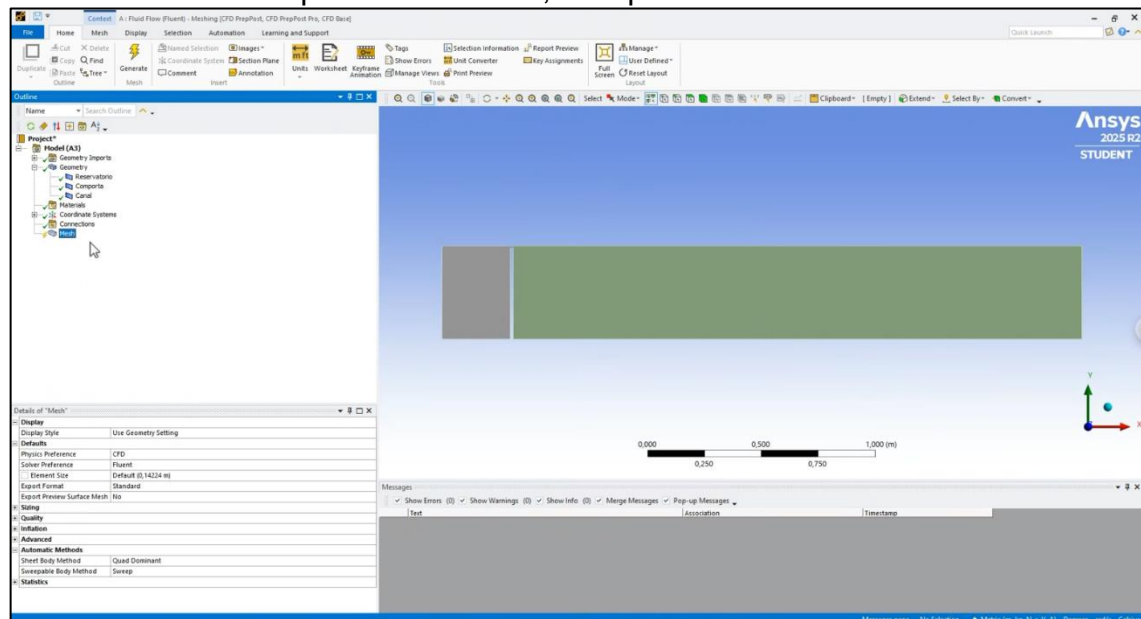
Com a geometria finalizada, parte-se para a geração da malha computacional. No projeto criado no *Workbench*, seleciona-se a célula *Mesh*, conforme indicado na Figura A.18, dando início ao processador de malha (*Meshing*).

Figura A.18 – Seleção da célula *Mesh* no *Project Schematic* do *Workbench*.



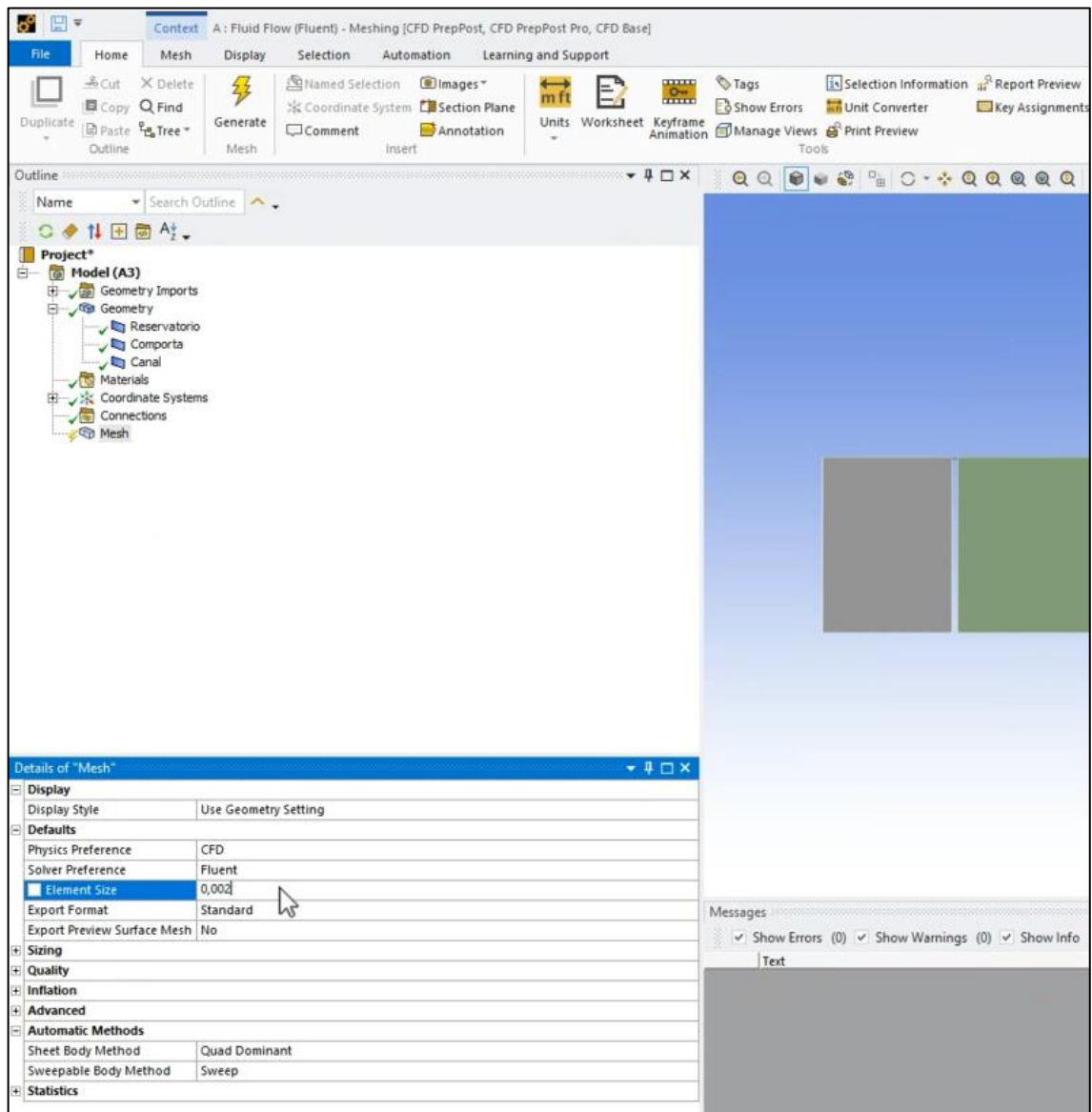
Ao ser aberto, o *Meshing* exibe, na árvore do projeto (*Outline*), os três corpos da geometria (Reservatório, Comporta e Canal) bem como a malha, ainda não processada, conforme ilustrado na Figura A.19.

Figura A.19 – Interface do *Meshing* recém-aberta, com a árvore do projeto exibindo os corpos Reservatório, Comporta e Canal e *Mesh*.



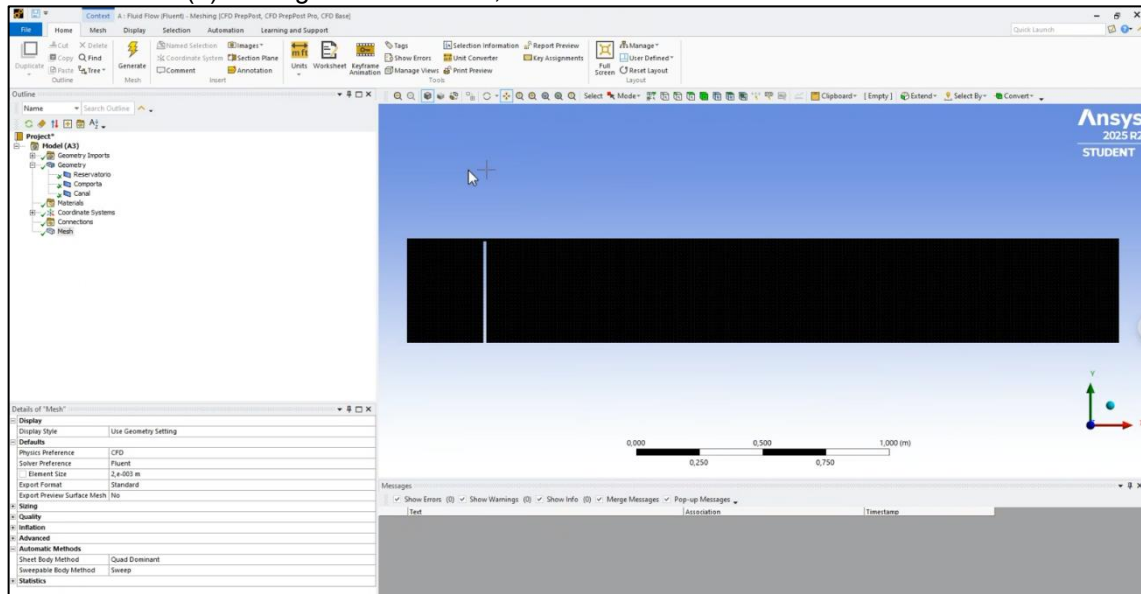
Selecionando-se *Mesh*, é exibido o painel *Details of “Mesh”*, no qual se define o tamanho dos elementos. Neste trabalho, optou-se por uma malha estruturada com elementos quadrilaterais (*Quad Dominant*), com tamanho global de elemento (*Element Size*) igual a 2 mm, como indicado na Figura A.20.

Figura A.20 – Definição do tamanho global de elemento (*Element Size*) igual a 2 mm.

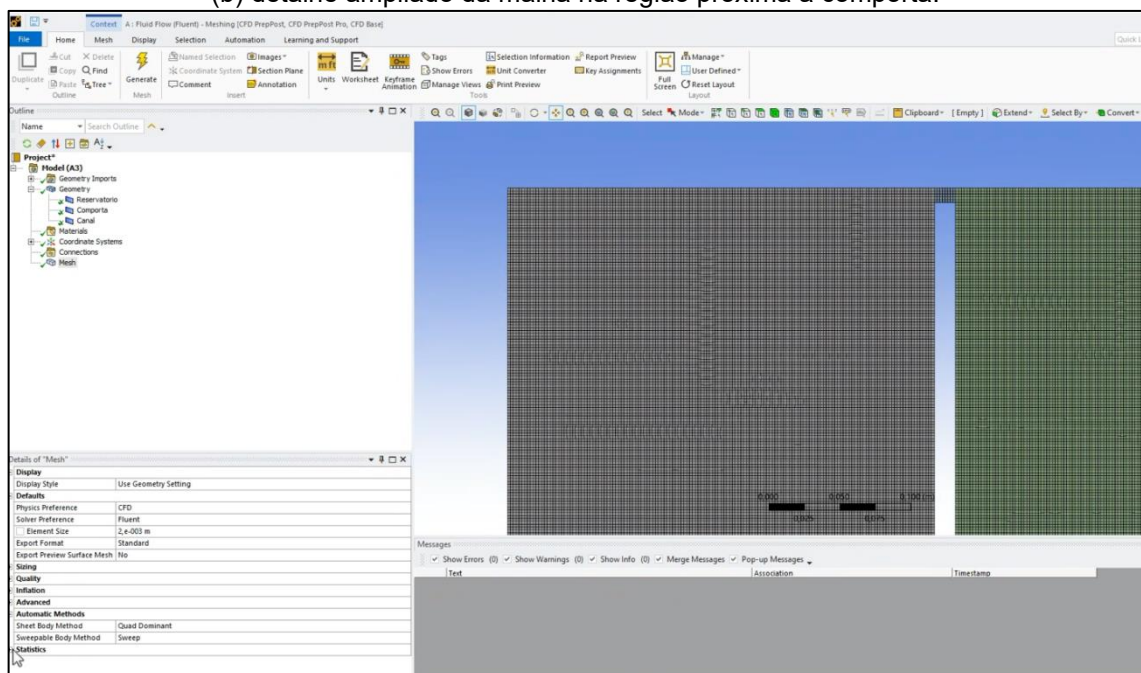


Ao confirmar o comando *Generate*, a malha é gerada (processo que, dependendo do tamanho do elemento definido e da extensão do domínio, pode levar alguns minutos). A Figura A.21 apresenta o resultado: em (a), a visão geral do domínio, na qual a elevada densidade de elementos faz com que a malha apareça praticamente como uma região sólida na escala da geometria completa; e, em (b), uma visão ampliada da região próxima à comporta, na qual é possível observar a estrutura quadrilateral dos elementos.

Figura A.21 – Malha gerada para o domínio computacional.
(a) visão geral do domínio, com elevada densidade de elementos.



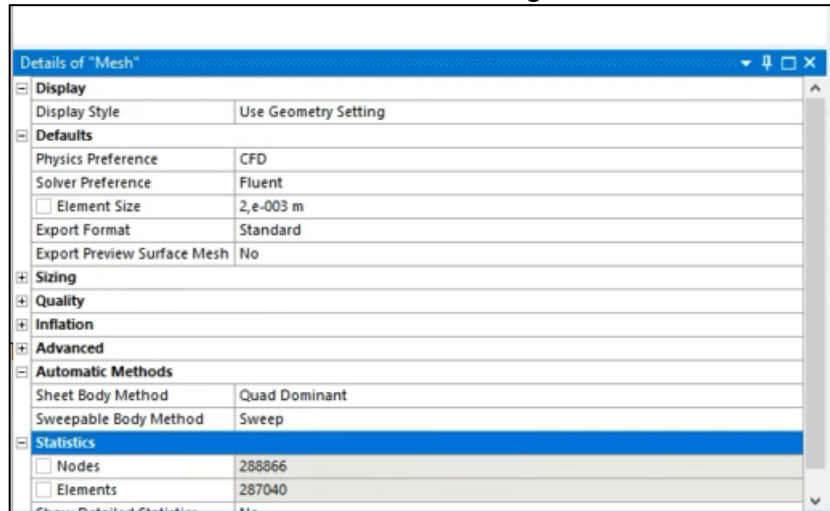
(b) detalhe ampliado da malha na região próxima à comporta.



Após a geração, é importante verificar as estatísticas da malha. Para isso, expande-se a seção *Statistics*, na parte inferior do painel *Details of “Mesh”*, na qual constam o número de nós (*Nodes*) e de elementos (*Elements*), como ilustrado na Figura A.22. Essa verificação é fundamental, pois a licença *ANSYS Fluent Student 2026 R1*, utilizada nas simulações deste trabalho, permite a resolução de malhas com,

no máximo, 512.000 elementos, limite que deve ser respeitado para que a simulação possa ser executada.

Figura A.22 – Seção *Statistics* do painel *Details of “Mesh”*, com o número de *Nodes* e *Elements* da malha gerada.



Concluída a geração da malha, o próximo passo consiste em definir as *Named Selections*, que correspondem às condições de contorno do domínio. Para facilitar a seleção das arestas, altera-se o modo de seleção para *Edge* (*Ctrl+E*), como indicado na Figura A.23. Em seguida, seleciona-se a aresta desejada e, com o botão direito do mouse, acessa-se a opção *Create Named Selection...*, apresentada na Figura A.24.

Figura A.23 – Alteração do modo de seleção para *Edge* (*Ctrl+E*).

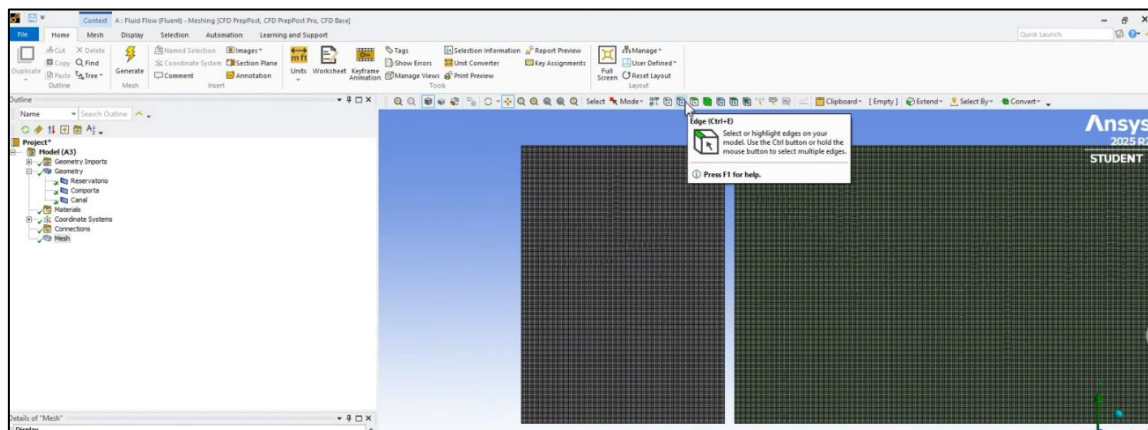
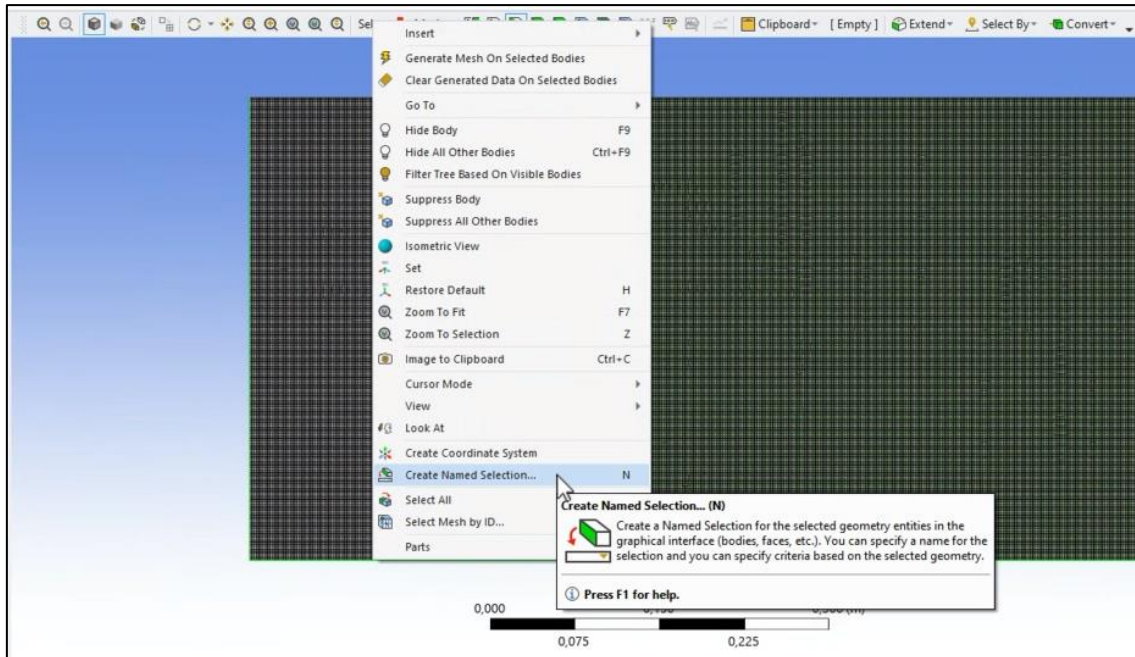


Figura A.24 – Acesso à opção *Create Named Selection...* pelo menu de contexto.



Ao confirmar o comando, é exibida a caixa de diálogo *Selection Name*, na qual se define o nome da condição de contorno correspondente. A Figura A.25 ilustra a criação da primeira condição, denominada *wall*, referente a parede lateral esquerda e fundo do reservatório e canal.

Uma vez criada, a *Named Selection* passa a ser exibida na árvore do projeto, *Named Selections*, podendo ser conferida e editada a qualquer momento, conforme ilustrado na Figura A.26.

Figura A.25 – Caixa de diálogo *Selection Name* para criação da condição *wall*.

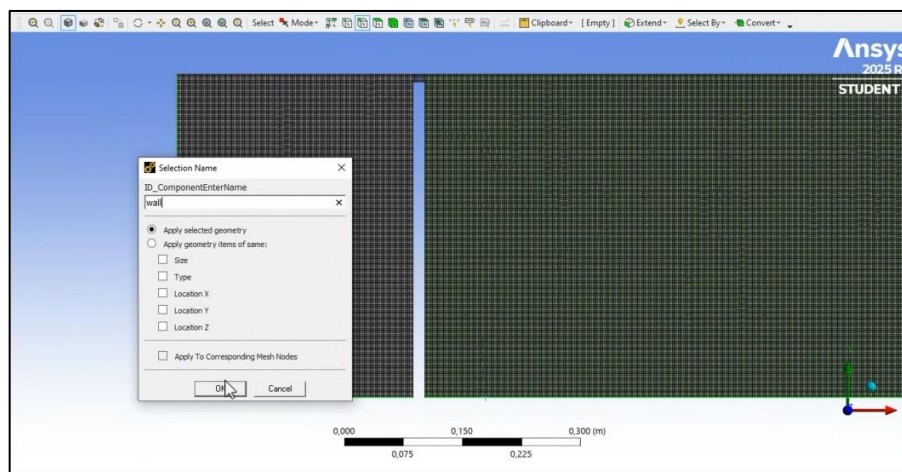
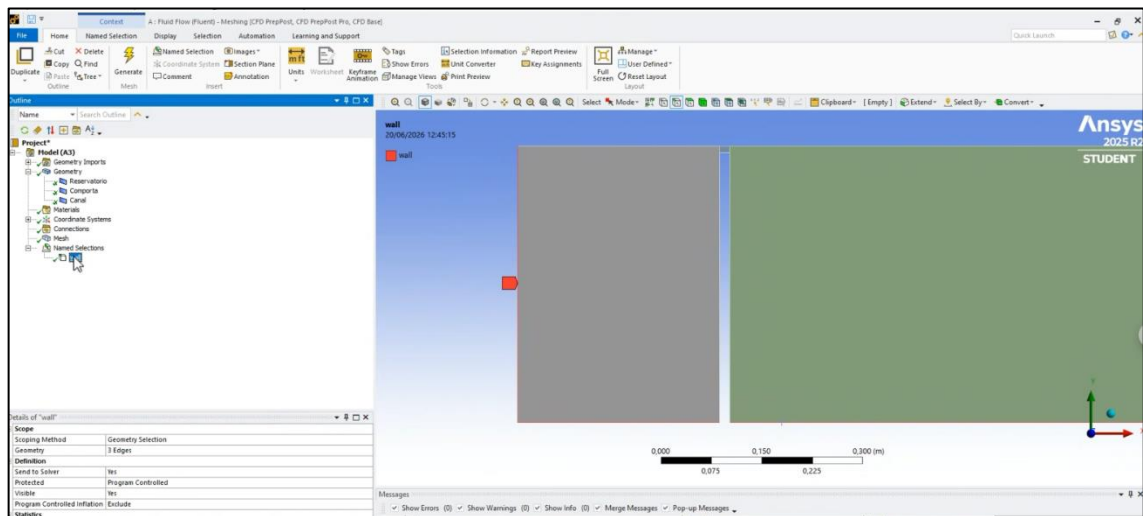
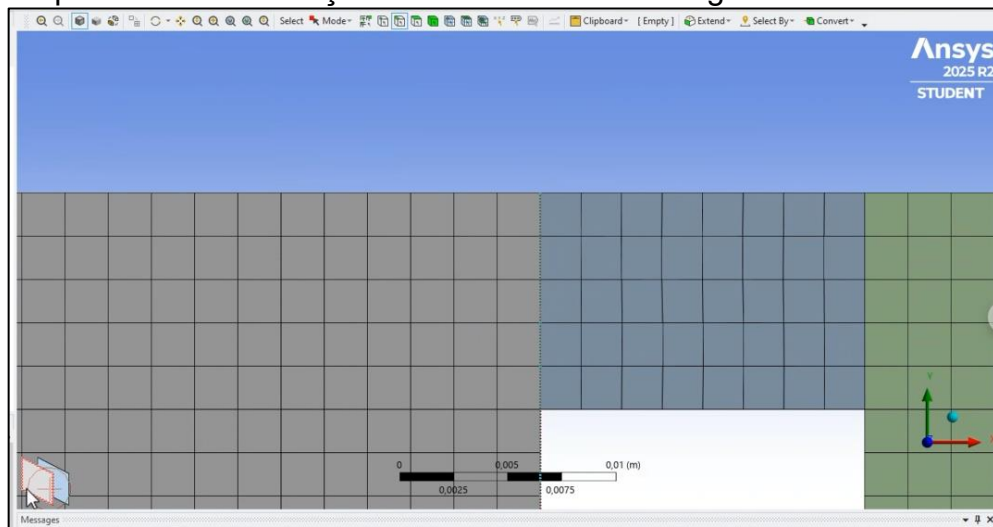


Figura A.26 – Condição *wall* exibida na árvore do projeto, sob o nó *Named Selections*.



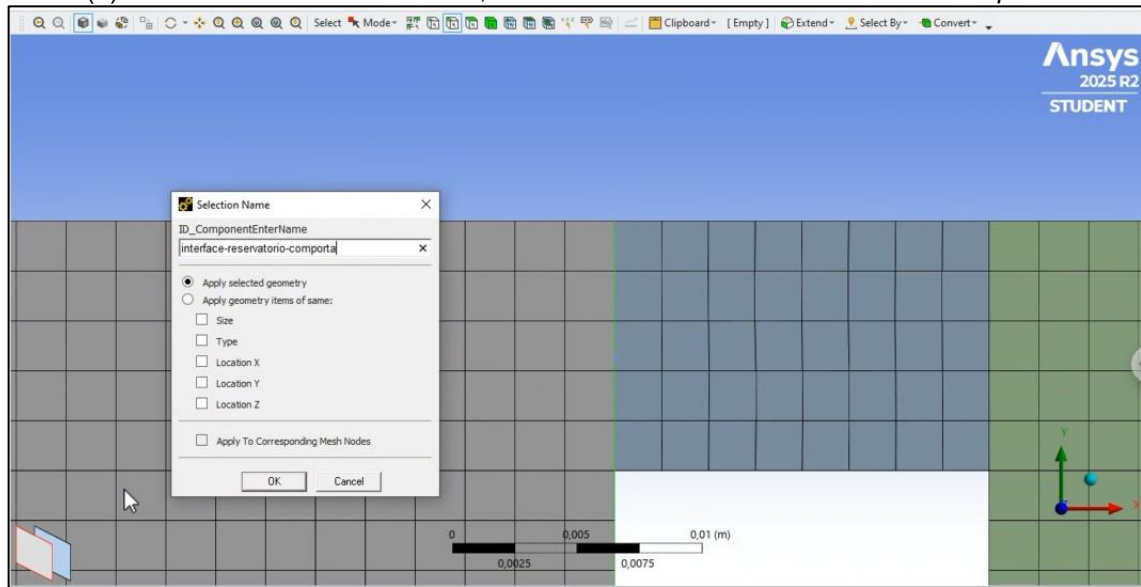
O mesmo procedimento é repetido para as demais condições de contorno do domínio, incluindo as interfaces entre os diferentes corpos da geometria. Nessas regiões de encontro entre malhas, a seleção da aresta correta pode ser dificultada pela proximidade entre as arestas de corpos distintos; nesses casos, recomenda-se utilizar a visualização isométrica das arestas, disponível no canto inferior esquerdo da janela gráfica, como destacado na Figura A.27, o que facilita a identificação da aresta pertencente ao corpo desejado.

Figura A.27 – Visualização isométrica das arestas (canto inferior esquerdo), utilizada para facilitar a seleção da aresta correta na região de interface.

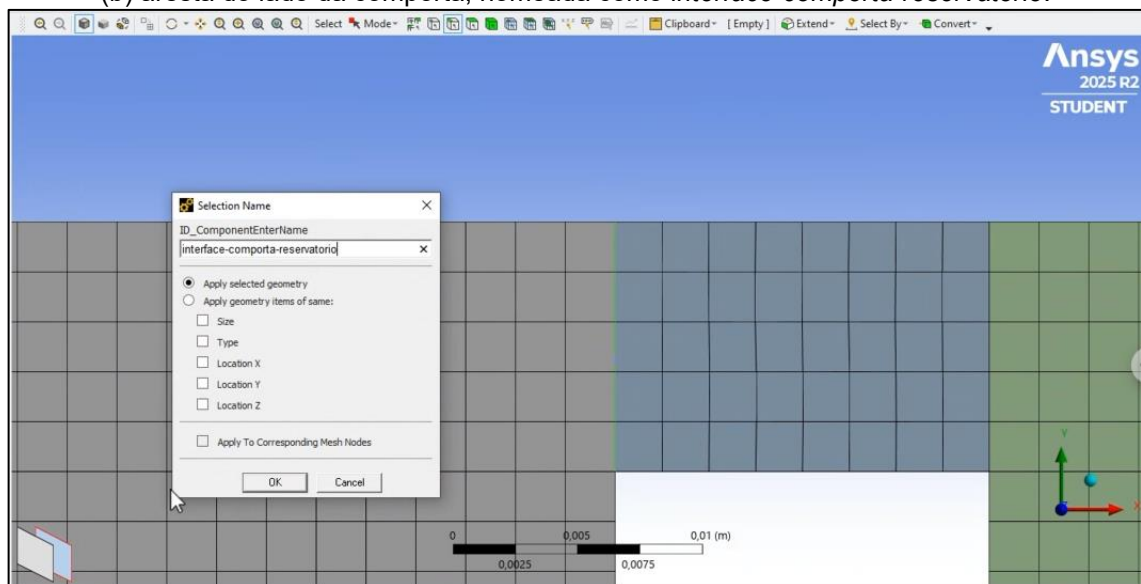


É importante destacar que, nas interfaces entre corpos, ambas as arestas em contato (uma de cada corpo) devem ser nomeadas individualmente. A Figura A.28 ilustra esse procedimento para a interface entre o reservatório e a comporta: em (a), a aresta do lado do reservatório é nomeada como *interface-reservatorio-comporta*; e, em (b), a aresta correspondente do lado da comporta é nomeada como *interface-comporta-reservatorio*. O mesmo procedimento é repetido, de forma análoga, para a interface entre a comporta e o canal.

Figura A.28 – Nomeação das arestas da interface entre o reservatório e a comporta.
 (a) aresta do lado do reservatório, nomeada como *interface-reservatorio-comporta*.

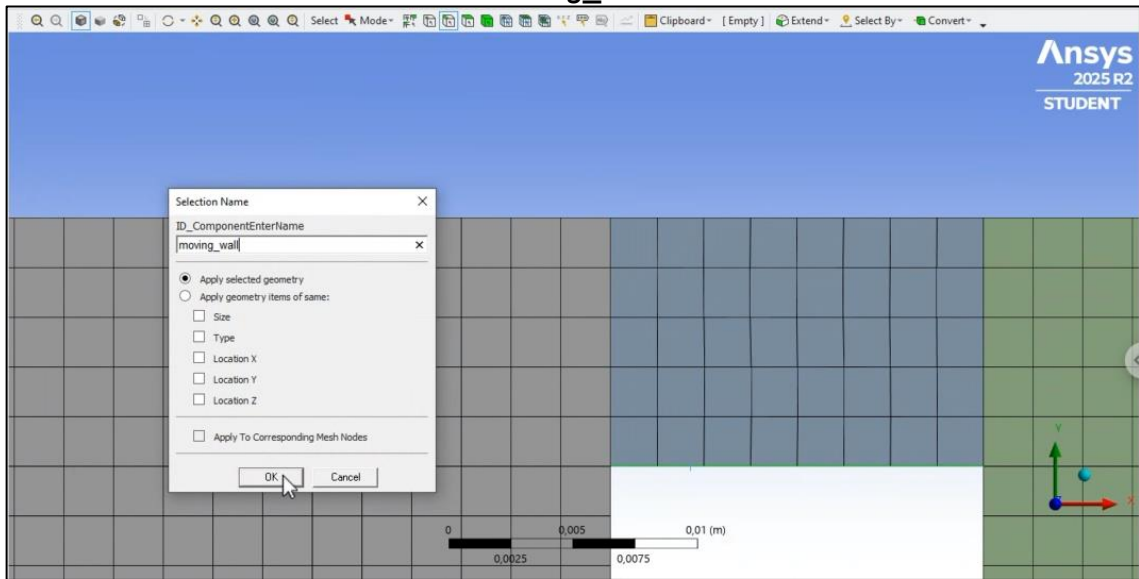


(b) aresta do lado da comporta, nomeada como *interface-comporta-reservatorio*.



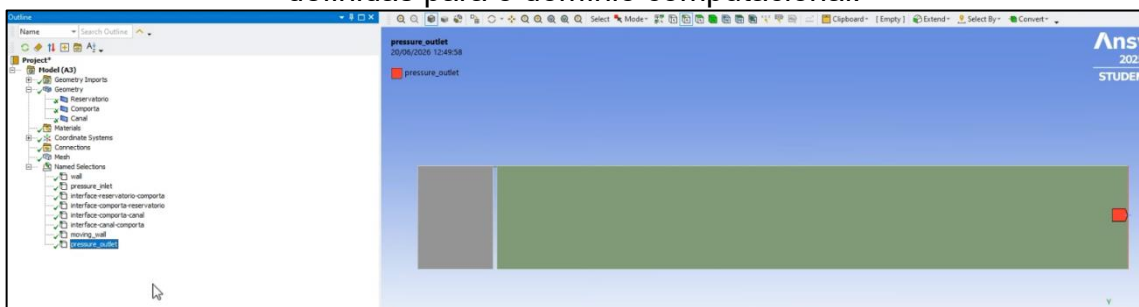
Outro ponto que merece atenção especial é a nomeação da parede móvel da comporta, isto é, a aresta que será deslocada pela *UDF* de movimento da comporta. Essa condição de contorno deve, obrigatoriamente, receber o mesmo nome utilizado na definição da *UDF*; neste trabalho, adotou-se o nome *moving_wall*, como ilustrado na Figura A.29.

Figura A.29 – Criação da condição de contorno da parede móvel, denominada *moving_wall*.



Ao final do processo, todas as condições de contorno do domínio, incluindo as entradas e saídas de pressão (*pressure_inlet* e *pressure_outlet*), as interfaces entre os corpos e a parede móvel, devem estar corretamente definidas e visíveis na árvore do projeto, conforme apresentado na Figura A.30. Recomenda-se a conferência dessa lista antes de prosseguir, de modo a evitar erros na definição das condições de contorno durante a etapa de configuração da simulação no *Fluent*.

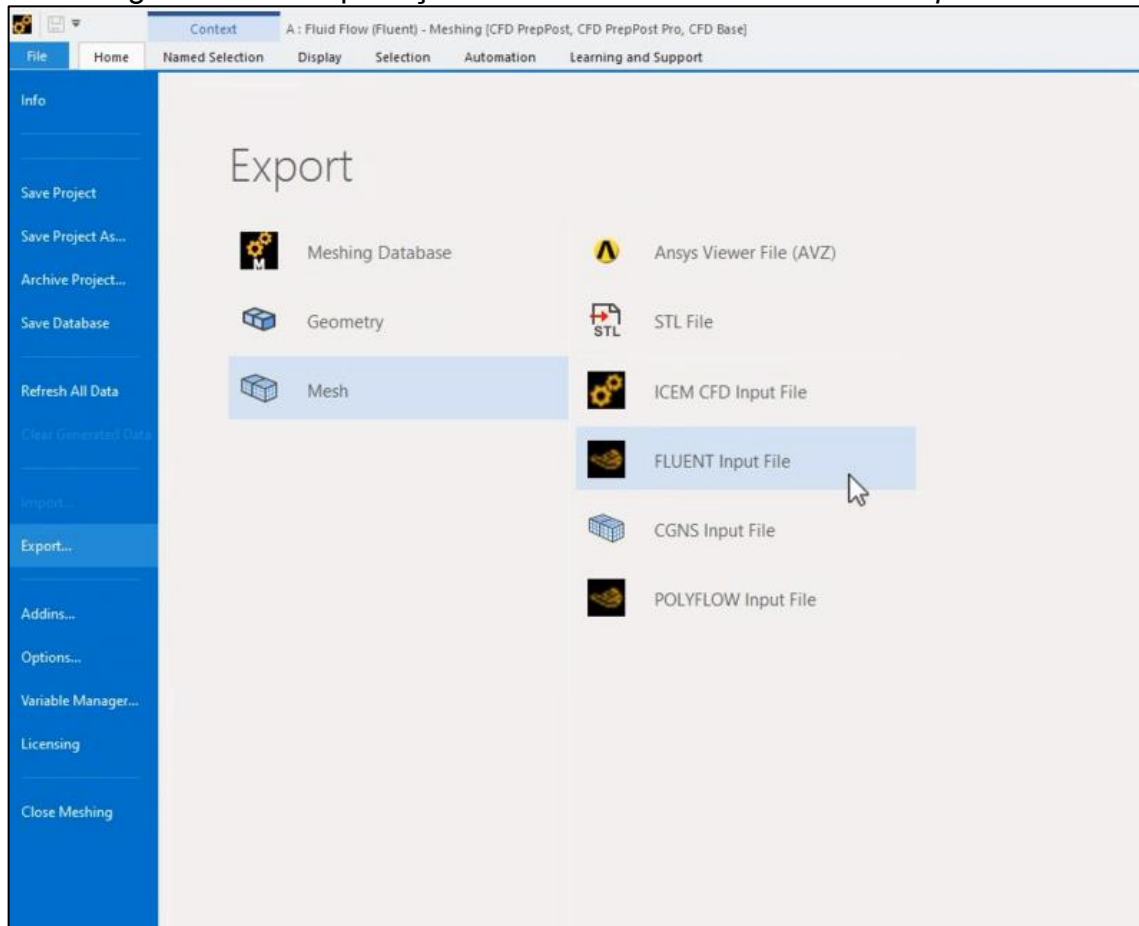
Figura A.30 – Lista completa das condições de contorno (*Named Selections*) definidas para o domínio computacional.



Por fim, com a malha validada, exporta-se o arquivo no formato compatível com o *Fluent*. Para isso, acessa-se o menu *File > Export*, seleciona-se a opção *Mesh* e, em seguida, o formato *FLUENT Input File*, conforme indicado na Figura A.31, gerando

um arquivo com extensão *.msh* que será posteriormente importado na etapa de configuração (*Setup*) da simulação.

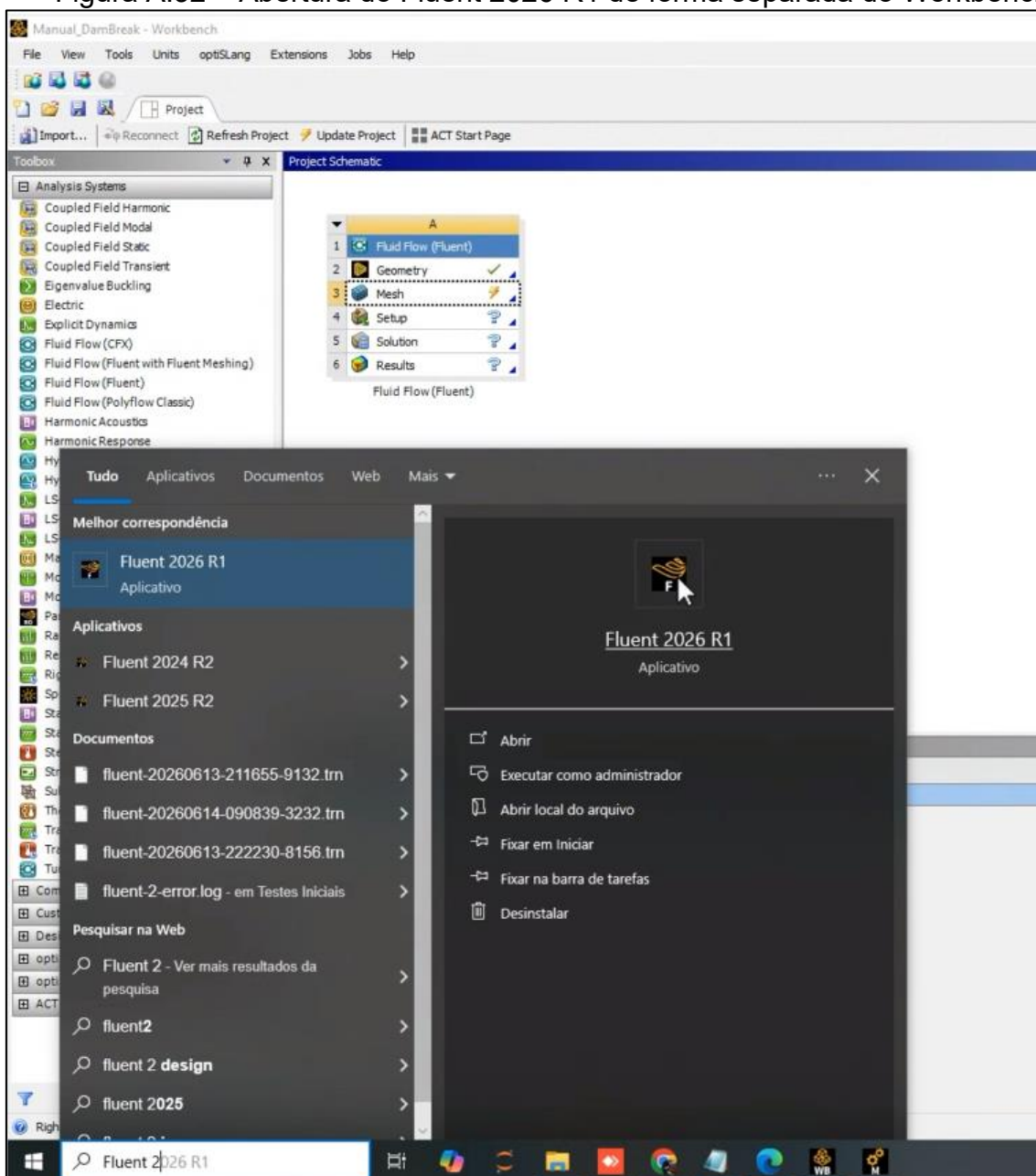
Figura A.31 – Exportação da malha no formato *FLUENT Input File*.



A.5 Configuração da Simulação no Fluent

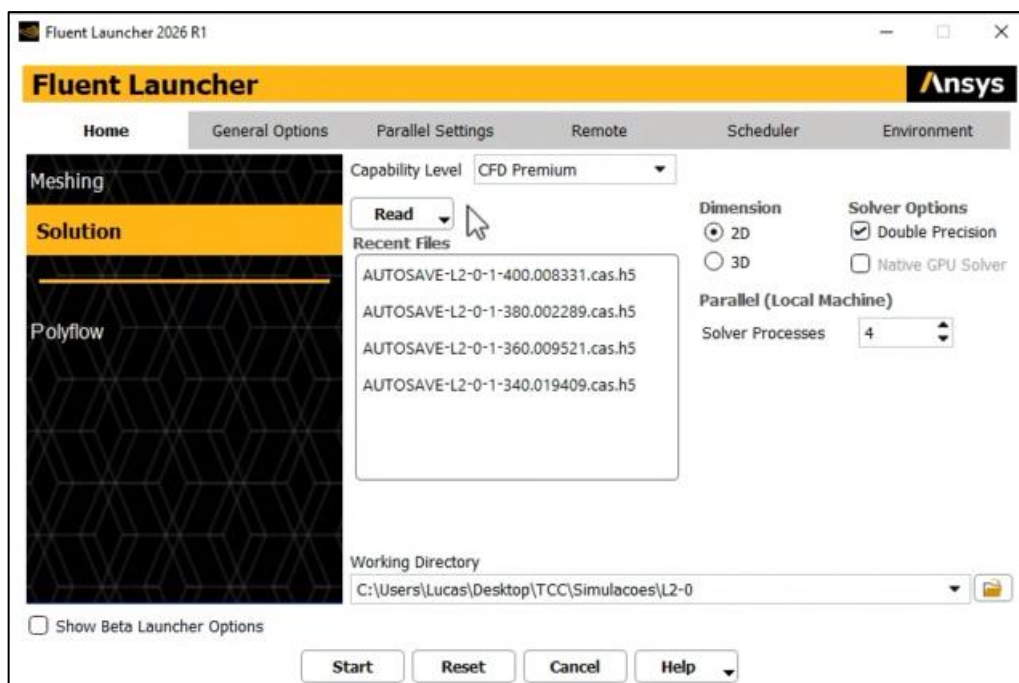
Para a configuração da simulação, optou-se por abrir o *Fluent* de forma isolada, em vez de fazê-lo diretamente pelo *Workbench*. Essa escolha não é obrigatória, mas traz uma vantagem prática: trabalhando de forma isolada, o *Fluent* pode ser aberto e fechado livremente, sem a necessidade de manter o projeto do *Workbench* carregado, o que torna o processo de ajuste e reinicialização do caso mais rápido e flexível, conforme indicado na Figura A.32.

Figura A.32 – Abertura do Fluent 2026 R1 de forma separada do Workbench.

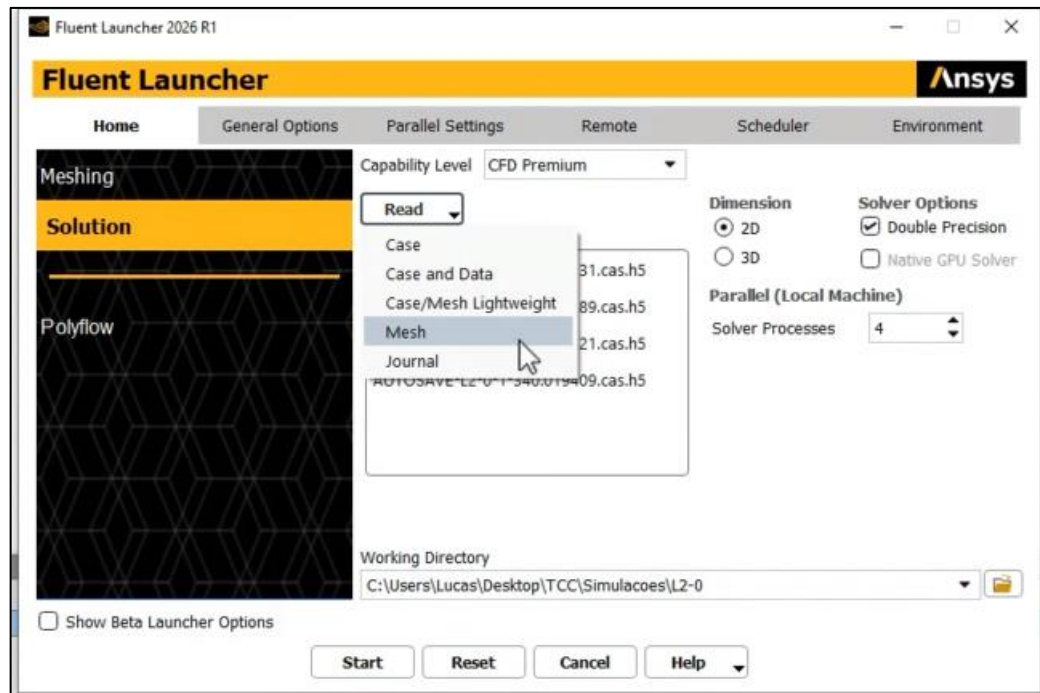


Ao ser aberto, o programa direciona o usuário ao *Fluent Launcher*, no qual já podem ser definidas algumas configurações iniciais da simulação: a *Dimension* deve ser ajustada para *2D*, uma vez que o domínio estudado é bidimensional, e a opção *Double Precision* deve ser ativada, fazendo com que o *Fluent* realize os cálculos com 16 algarismos significativos de precisão, em vez dos 8 utilizados por padrão, o que reduz o acúmulo de erros de arredondamento ao longo das iterações. Em seguida, pelo próprio *Launcher*, é possível solicitar a leitura da malha gerada na etapa anterior, por meio da opção *Read > Mesh*, selecionando o arquivo correspondente. A Figura A.33 ilustra esse processo: em (a), a tela principal do *Launcher*, com a *Dimension* e a *Double Precision* configuradas; em (b), o menu *Read* com a opção *Mesh* selecionada; e, em (c), a janela de seleção do arquivo de malha exportado na etapa anterior.

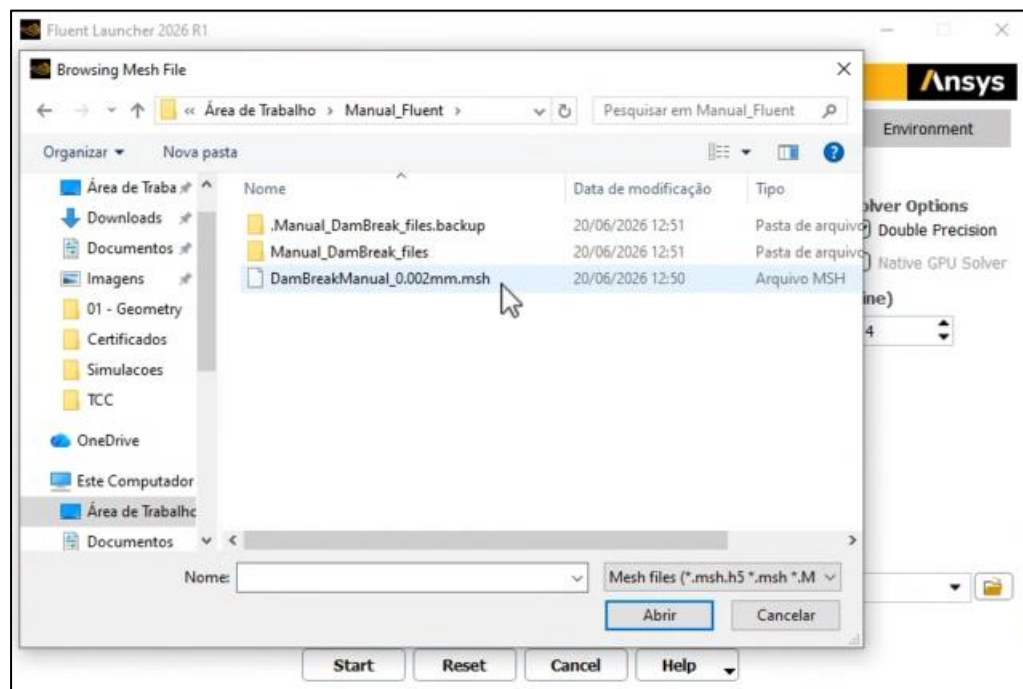
Figura A.33 – Configuração inicial e leitura da malha pelo *Fluent Launcher*.
(a) tela principal do *Launcher*, com *Dimension* = *2D* e *Double Precision* ativada.



(b) menu *Read* com a opção *Mesh* selecionada.



(c) seleção do arquivo de malha exportado (.msh).

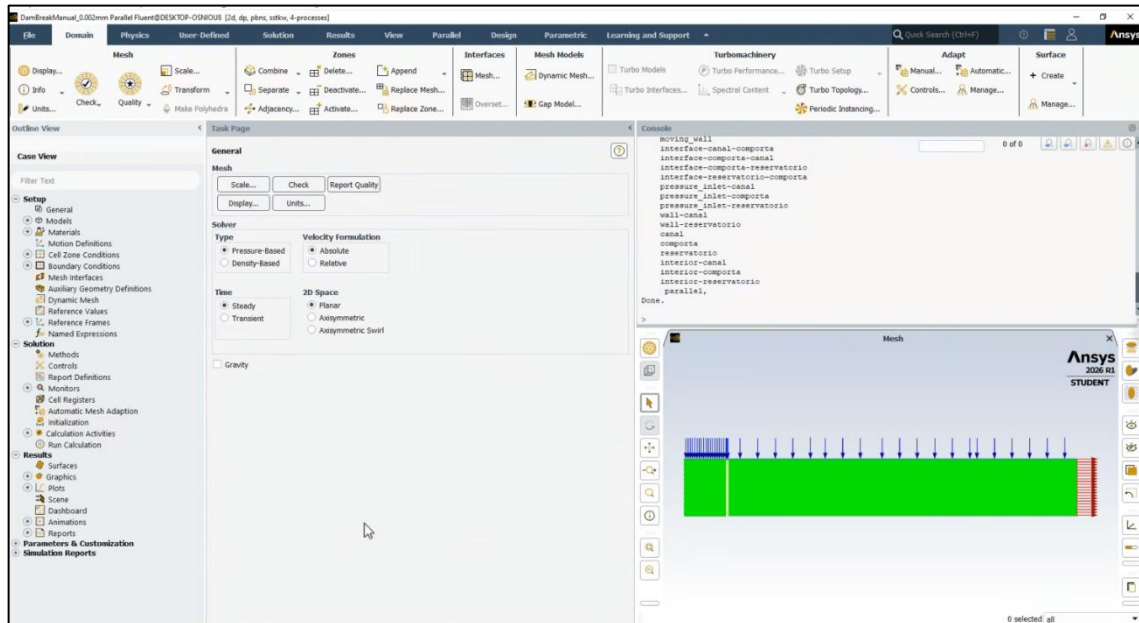


A.5.1 Configurações Gerais

Ao concluir a leitura, a malha é exibida na área gráfica do *Fluent*, já com as condições de contorno definidas na etapa de geração da malha. Caso a malha não

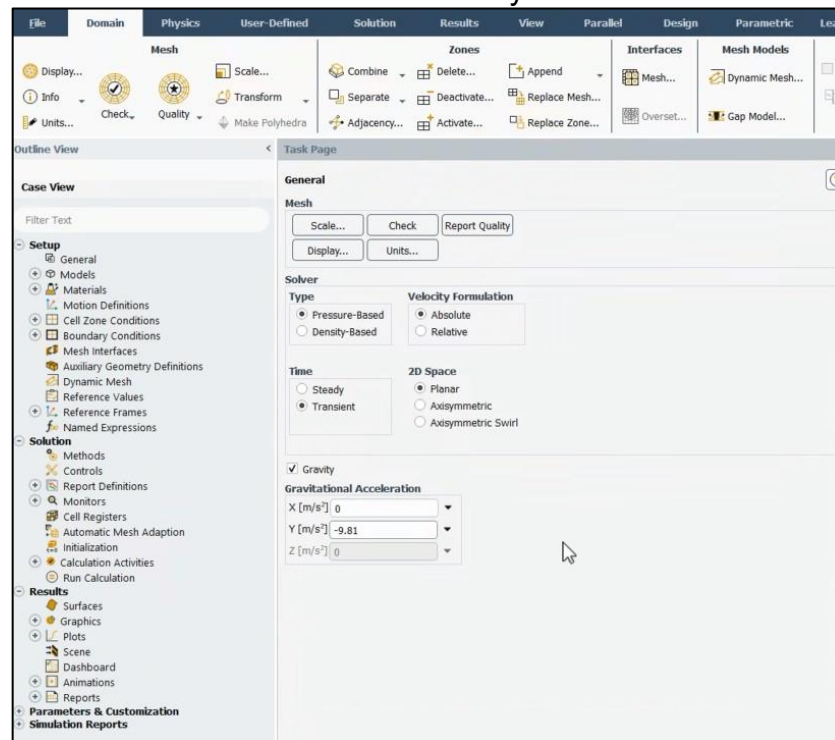
seja exibida automaticamente, basta utilizar a opção *Display*, disponível na aba *General*. A Figura A.34 apresenta a interface do *Fluent* imediatamente após a leitura da malha, com o console listando as zonas de contorno reconhecidas (paredes, interfaces, entradas e saídas de pressão e a parede móvel).

Figura A.34 – Interface do *Fluent* após a leitura da malha, com as condições de contorno reconhecidas exibidas no console.



Na sequência, ainda na aba *General*, inicia-se a configuração do caso propriamente dito. Ativa-se o modelo *Transient*, uma vez que o escoamento estudado depende explicitamente do tempo (*flow time*), e habilita-se a opção *Gravity*, definindo a aceleração da gravidade como $-9,81 \text{ m/s}^2$ na direção *y*, como ilustrado na Figura A.35.

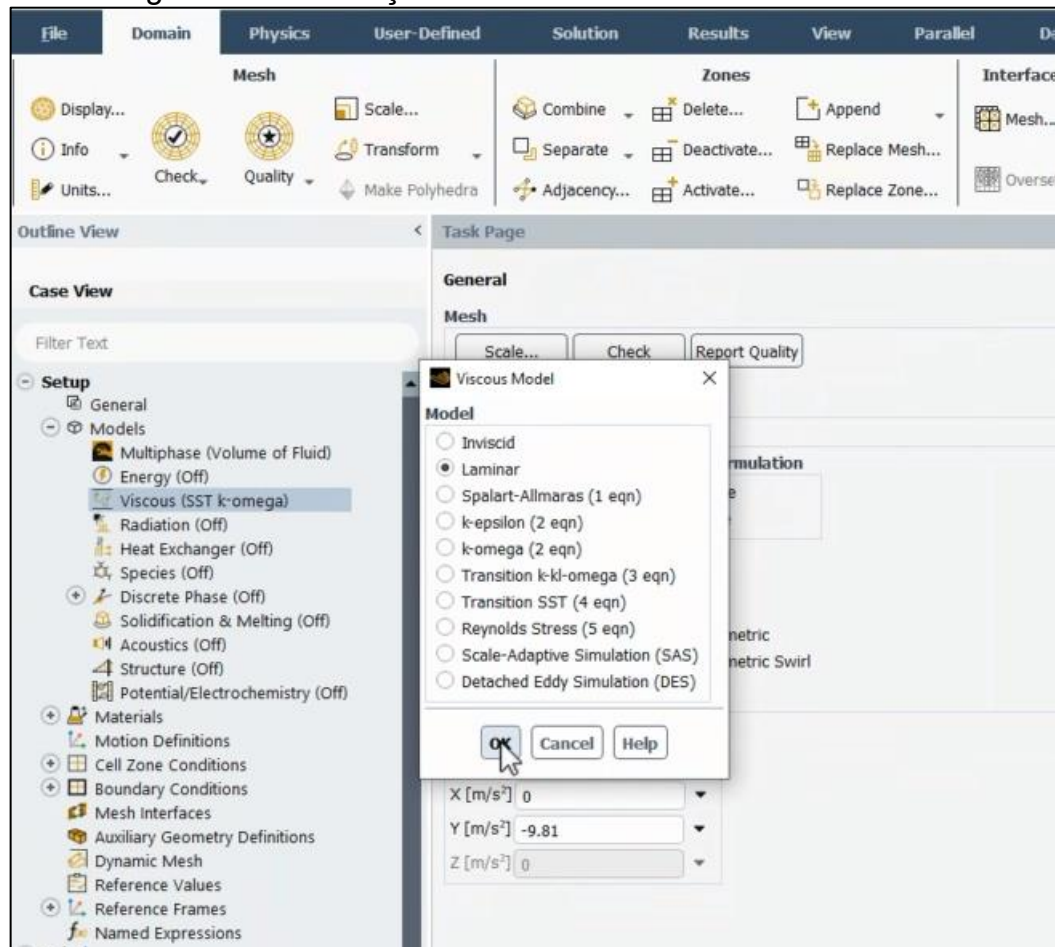
Figura A.35 – Ativação do modelo *Transient* e da *Gravity*, com aceleração de $-9,81 \text{ m/s}^2$ no eixo *y*.



Vale ressaltar que, caso o canal estudado esteja inclinado em relação à horizontal, como ocorre nos casos de validação baseados em Pereira (2023), é nesta mesma etapa que se realiza a decomposição do vetor gravidade nos eixos *x* e *y*, de acordo com o ângulo de inclinação do canal.

Por fim, define-se o modelo de viscosidade do escoamento como *Laminar*, conforme indicado na Figura A.36.

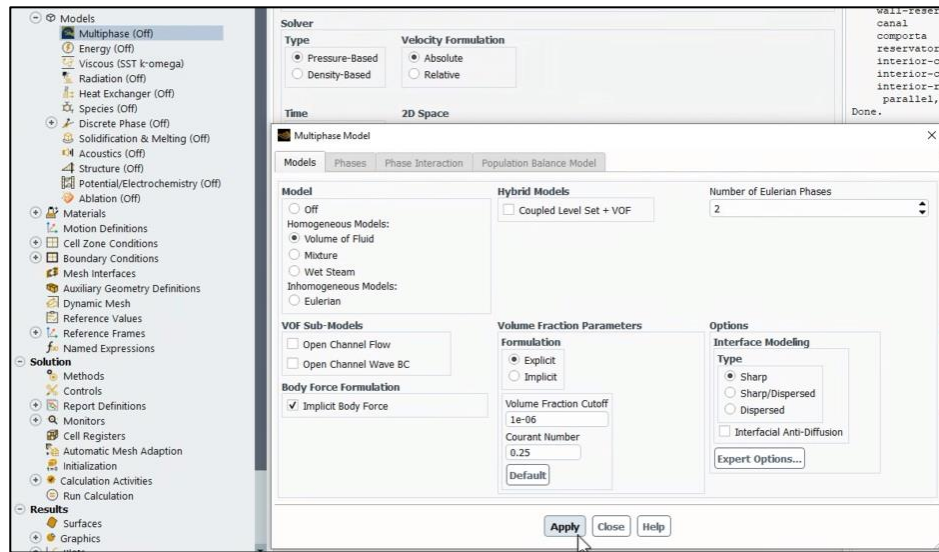
Figura A.36 – Seleção do modelo de viscosidade *Laminar*.



A.5.2 Modelo Multifásico e Definição dos Materiais

O próximo passo consiste em habilitar o modelo multifásico, na opção *Multiphase*, selecionando *Volume of Fluid (VOF)*, adequada para escoamentos com duas fases separadas por uma interface bem definida (neste caso, ar e Carbopol). Habilita-se também a opção *Implicit Body Force*, como indicado na Figura A.37.

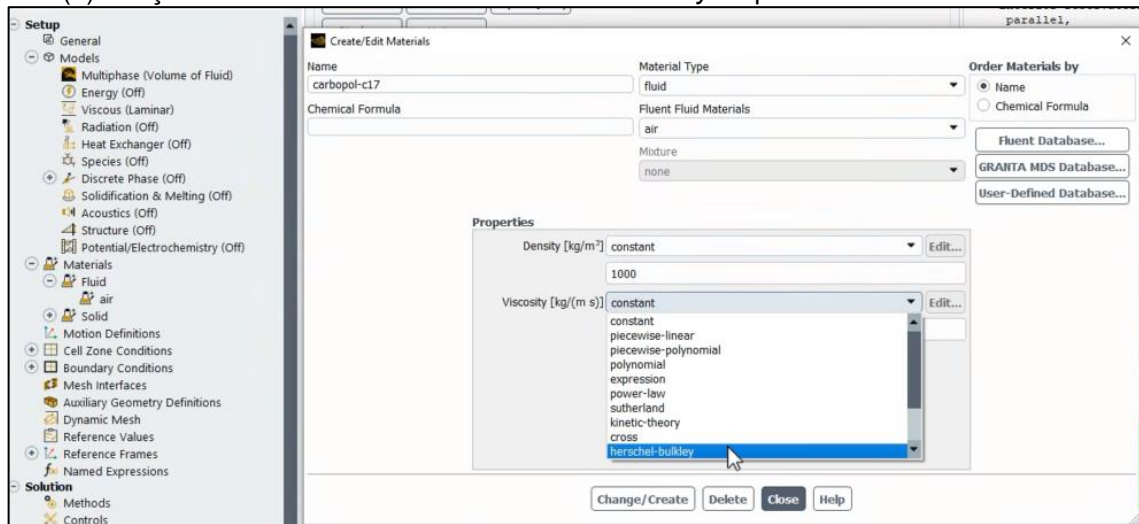
Figura A.37 – Ativação do modelo multifásico *Volume of Fluid (VOF)* com a opção *Implicit Body Force*.



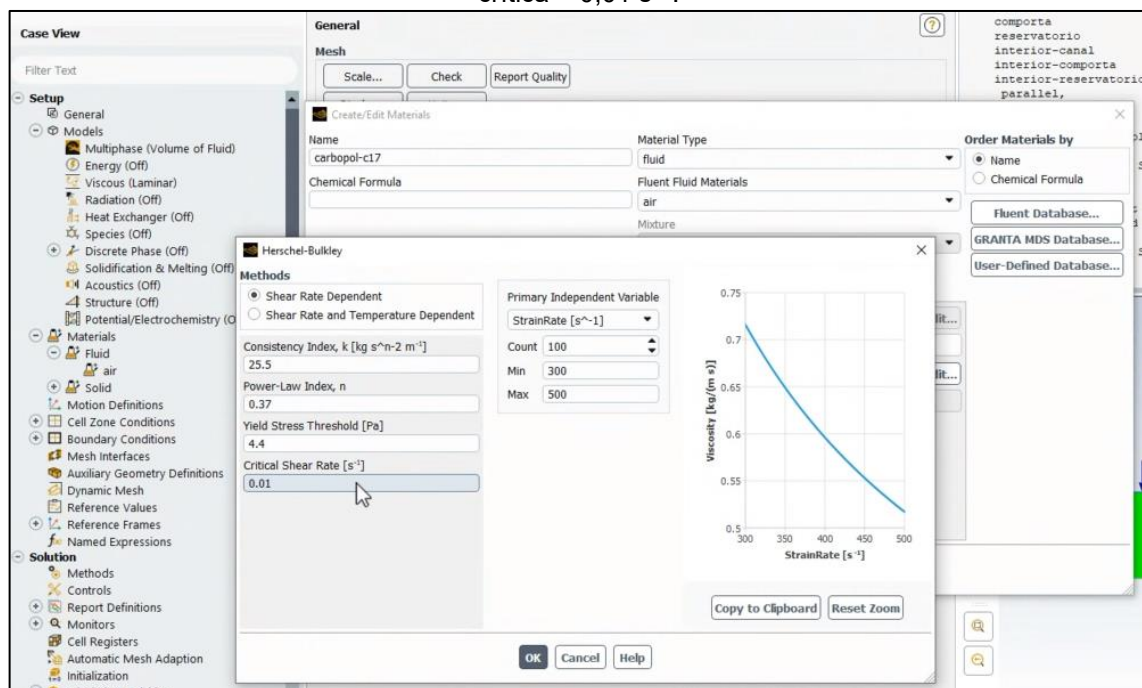
Em seguida, no painel *Materials*, cria-se o material correspondente ao fluido utilizado no caso de validação de Liu (2018), o Carbopol C-17, nomeado neste trabalho como *carbopol-c17*, com massa específica constante de 1000 kg/m^3 . Para representar seu comportamento reológico viscoplástico, define-se o modelo de viscosidade como *Herschel-Bulkley*, inserindo os parâmetros reológicos do material: índice de consistência $K = 25,5 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$; índice de comportamento (*Power-Law Index*) $n = 0,37$; tensão limite de escoamento (*Yield Stress Threshold*) $\tau_0 = 4,4 \text{ Pa}$; e taxa de cisalhamento crítica (*Critical Shear Rate*), conforme apresentado na Figura A.38.

Figura A.38 – Criação do material *carbopol* e definição do modelo reológico *Herschel-Bulkley*.

(a) seleção do modelo de viscosidade *herschel-bulkley* no painel *Create/Edit Materials*.



(b) parâmetros reológicos inseridos: $K = 25,5$; $n = 0,37$; tensão limite = 4,4 Pa; taxa de cisalhamento crítica = $0,01 \text{ s}^{-1}$.



Ao final dessa etapa, o painel de materiais fluidos passa a conter dois materiais: *air* e *carbopol-c17*, como ilustrado na Figura A.39. Retorna-se, então, à opção *Multiphase*, na aba *Phases*, e define-se o ar como *phase-1* e o Carbopol como *phase-2*, conforme ilustrado na Figura A.40.

Figura A.39 – Materiais fluidos disponíveis após a criação do *carbopol-c17*.

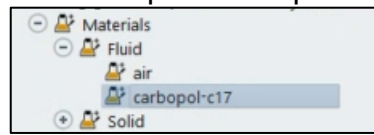
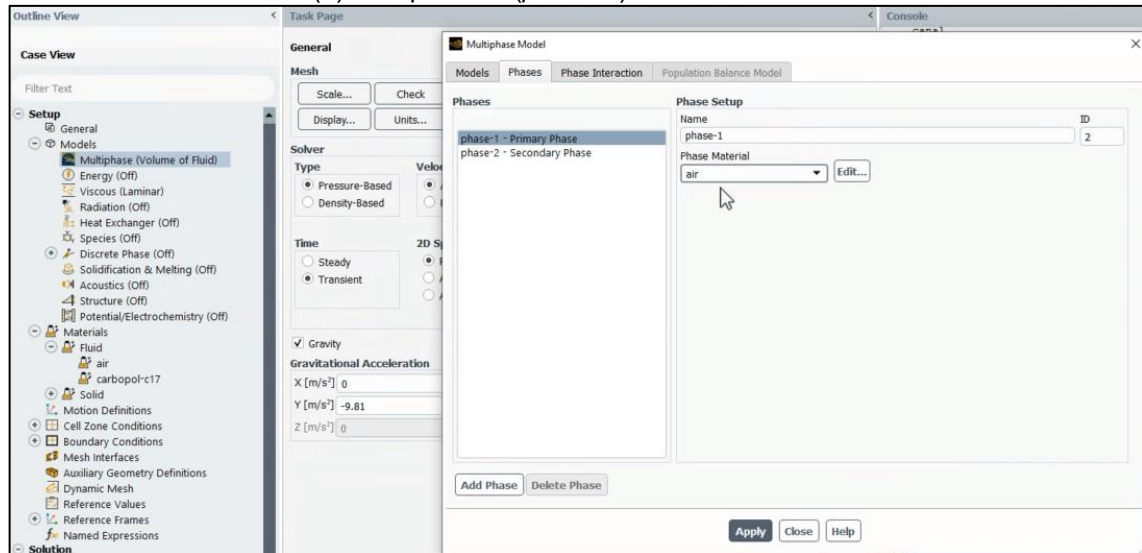
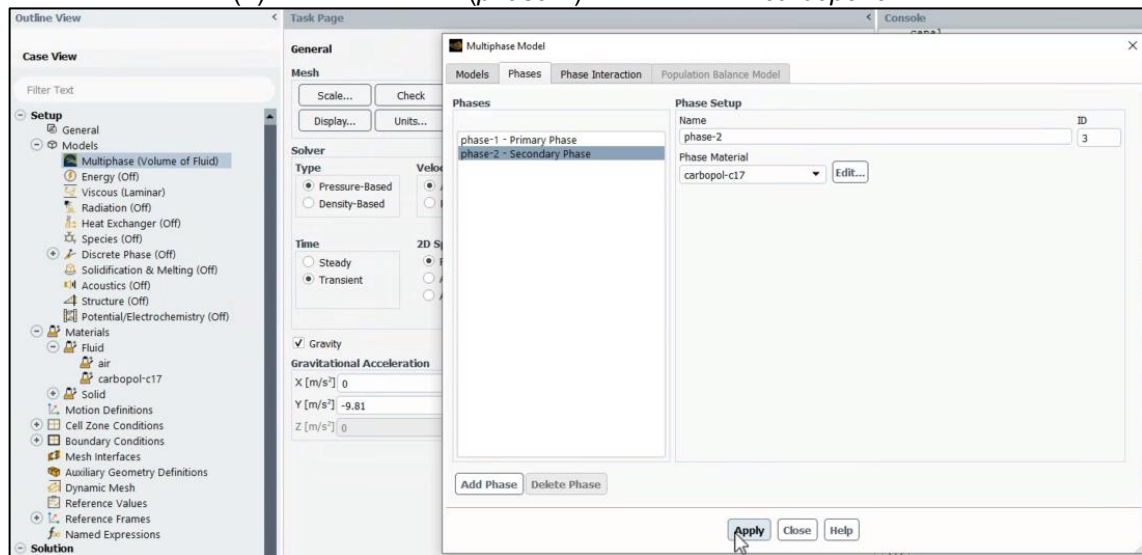


Figura A.40 – Definição das fases do modelo multifásico.

(a) fase primária (*phase-1*) definida como *air*.



(b) fase secundária (*phase-2*) definida como *carbopol-c17*.

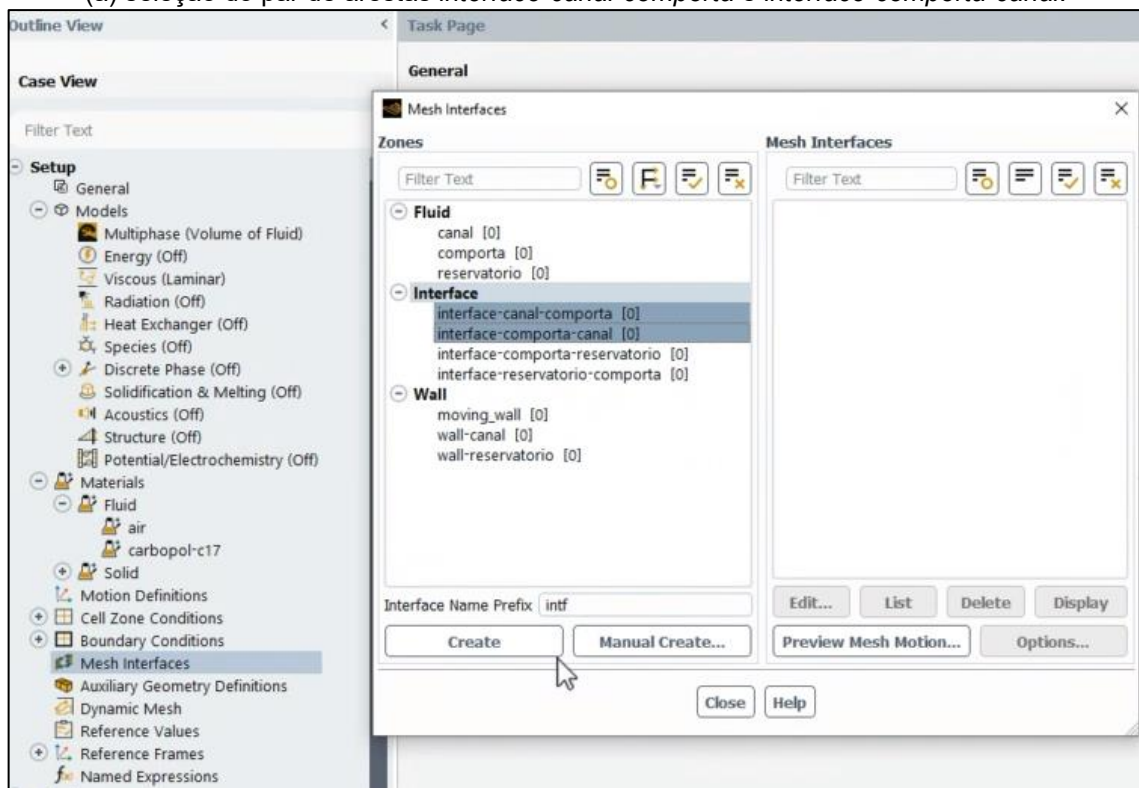


A.5.3 Criação das Interfaces de Malha

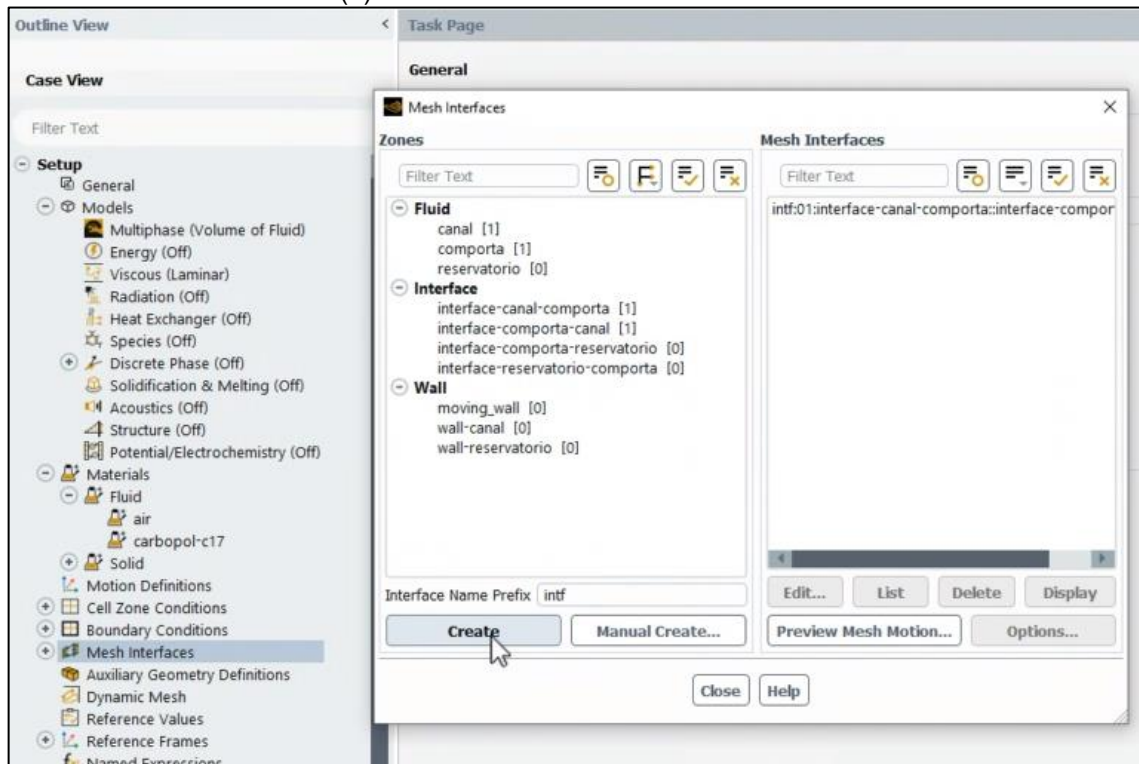
Na aba *Mesh Interfaces*, devem ser criadas as interfaces entre as arestas que se conectam: neste caso, entre o reservatório e a comporta, e entre a comporta e o

canal. Como visto no Apêndice referente à malha, essas arestas já haviam sido nomeadas em pares (uma de cada corpo) durante a etapa de definição das *Named Selections*. Seleccionam-se, então, as duas arestas correspondentes a uma mesma região de contato (por exemplo, *interface-comporta-canal* e *interface-canal-comporta*) e aciona-se o comando *Create*, como ilustrado na Figura A.41: em (a), a seleção do par de arestas, antes da criação de qualquer interface; e, em (b), o resultado após a criação, identificado na lista de *Mesh Interfaces* como *intf:01*.

Figura A.41 – Criação da primeira interface de malha (comporta–canal).
(a) seleção do par de arestas *interface-canal-comporta* e *interface-comporta-canal*.



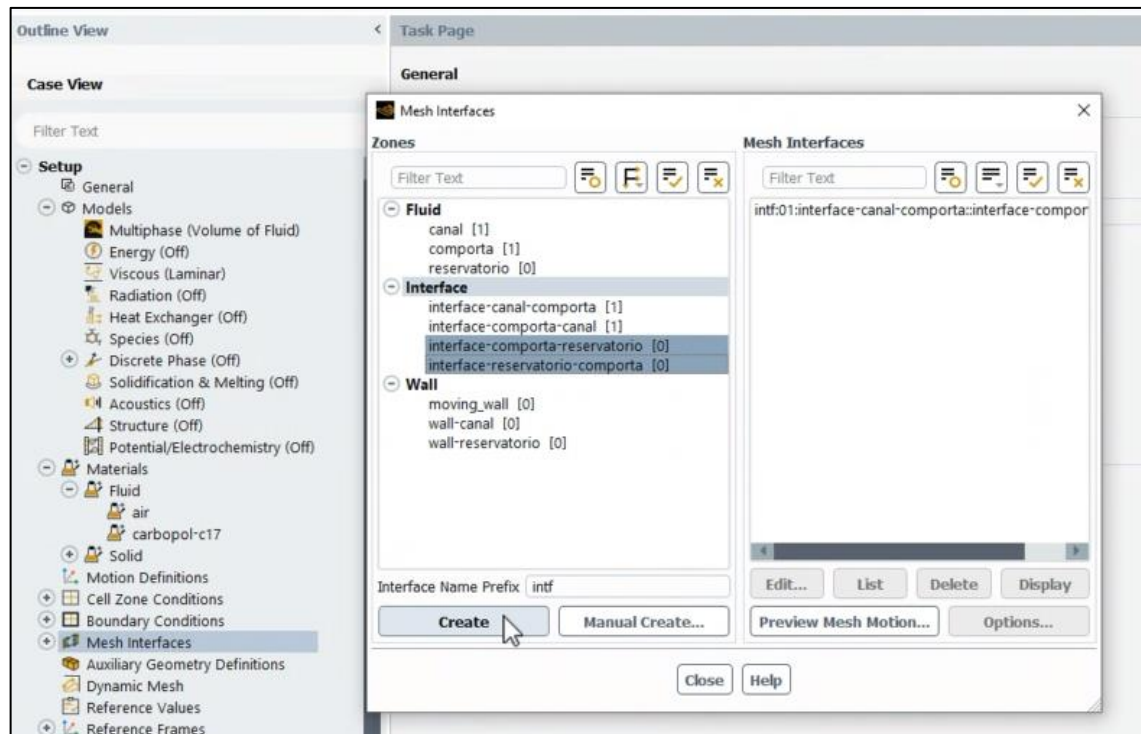
(b) interface *intf:01* criada com sucesso.



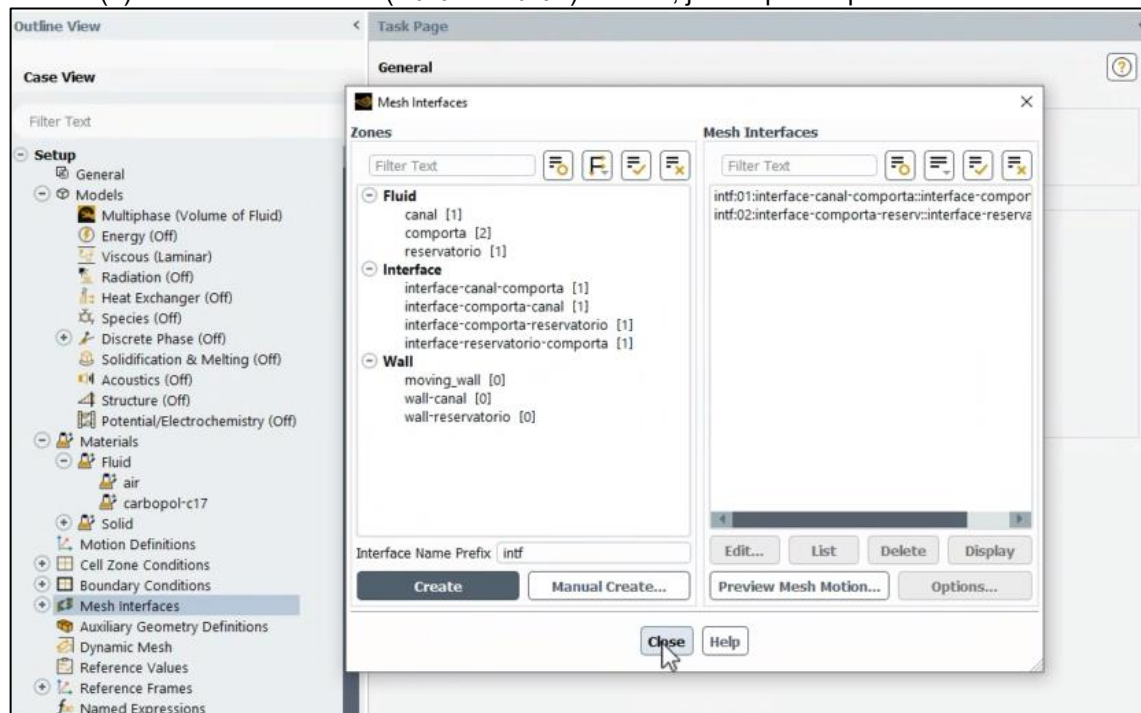
O mesmo procedimento é repetido para a segunda interface, entre o reservatório e a comporta. A Figura A.42 ilustra esse processo: em (a), a seleção do par *interface-comporta-reservatorio* e *interface-reservatorio-comporta*; e, em (b), o estado final, com ambas as interfaces (*intf:01* e *intf:02*) já criadas.

Figura A.42 – Criação da segunda interface de malha (reservatório–comporta).

(a) seleção do par de arestas *interface-comporta-reservatorio* e *interface-reservatorio-comporta*.

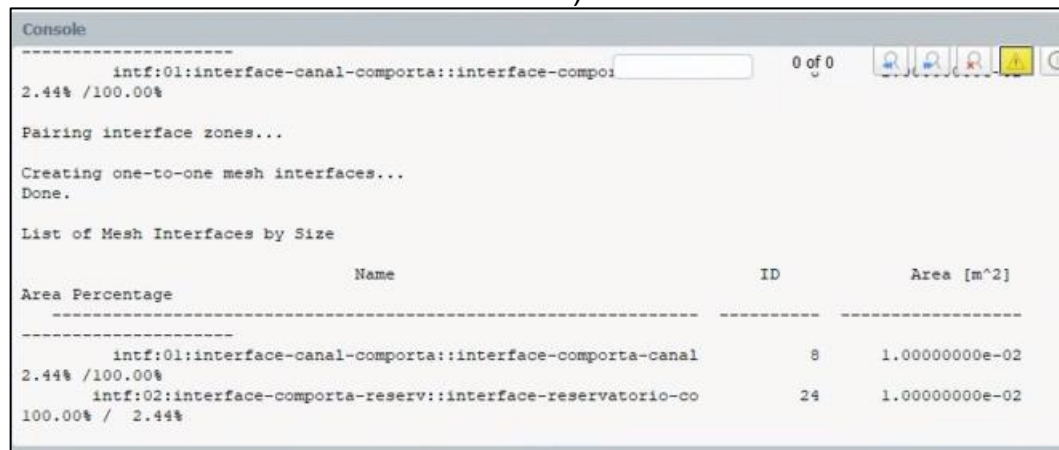


(b) ambas as interfaces (*intf:01* e *intf:02*) criadas; janela pronta para ser fechada.



Após a criação, o console do *Fluent* informa automaticamente os dados de cada interface gerada (nome, identificador e área), permitindo conferir se o pareamento das arestas foi realizado corretamente, como ilustrado na Figura A.43.

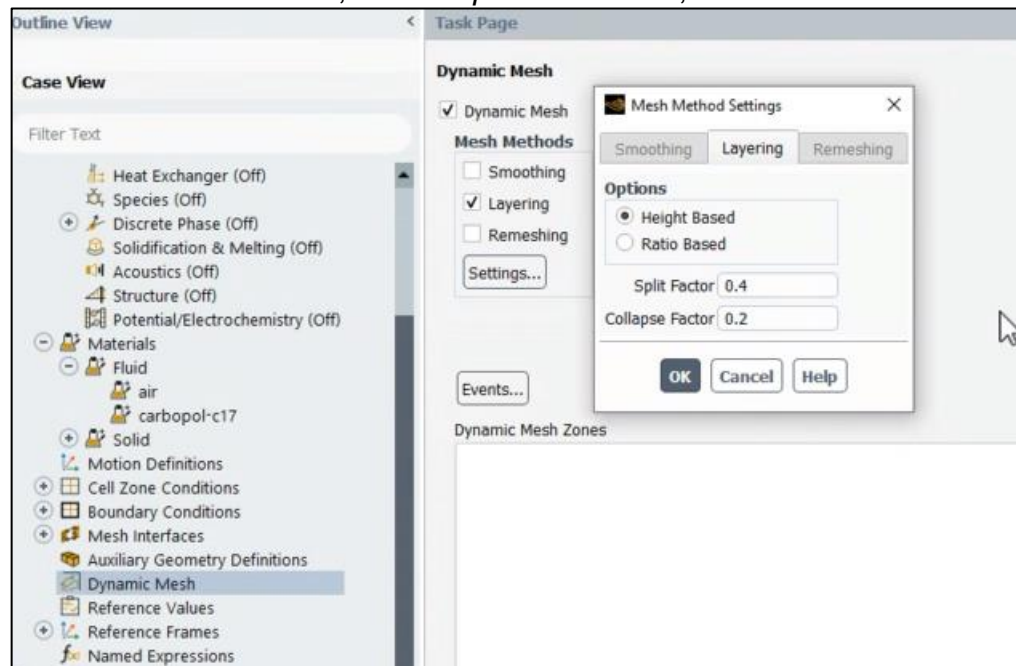
Figura A.43 – Confirmação, via console, da criação das interfaces de malha (*intf:01* e *intf:02*).



A.5.4 Malha Dinâmica

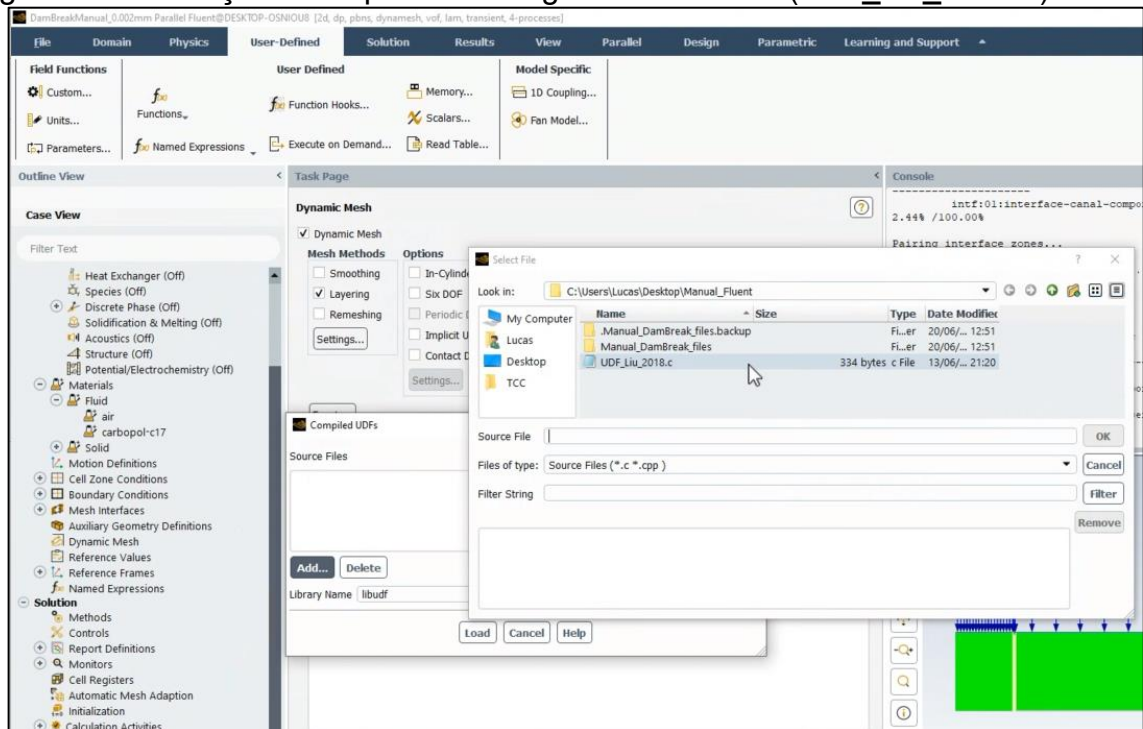
Na aba *Dynamic Mesh*, configura-se a movimentação da comporta ao longo da simulação. Utiliza-se a técnica de *Layering*, no modo *Height Based*, que controla o remalhamento da região adjacente à parede móvel adicionando ou removendo camadas de células conforme a comporta se desloca, em vez de deformar as células existentes, como faria a técnica de *Smoothing*. Dois parâmetros controlam esse processo: o *Split Factor* (definido como 0,4) determina a altura, em relação à altura ideal da célula, a partir da qual uma camada de células é dividida em duas, à medida que se afasta da parede móvel; e o *Collapse Factor* (definido como 0,2) determina a altura mínima, também em relação à altura ideal, abaixo da qual uma camada de células é colapsada (eliminada), à medida que se aproxima da parede móvel. Esses dois parâmetros, em conjunto, mantêm a qualidade da malha aproximadamente constante durante todo o movimento da comporta, conforme indicado na Figura A.44.

Figura A.44 – Configuração da técnica *Layering (Height Based)*, com *Split Factor* = 0,4 e *Collapse Factor* = 0,2.



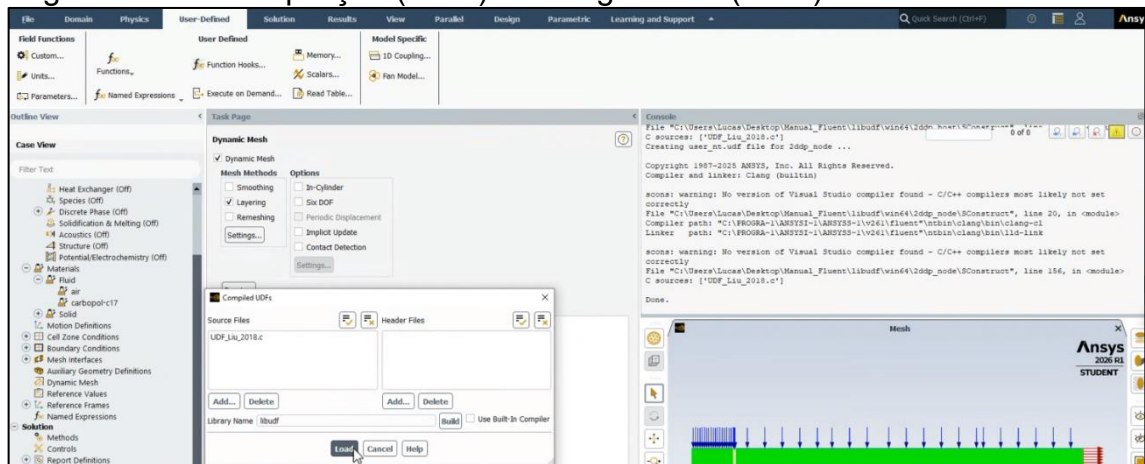
O movimento da comporta é definido por meio de uma *UDF (User-Defined Function)*, isto é, uma rotina escrita em linguagem C que estende as funcionalidades nativas do *Fluent*, permitindo programar comportamentos que não estão disponíveis diretamente na interface do programa, como, neste caso, uma lei de movimento prescrita para a comporta, dependente do tempo de simulação. A função utilizada é do tipo *DEFINE_CG_MOTION*, própria do *Fluent* para a definição de movimento de corpo rígido em malhas dinâmicas. O arquivo de código-fonte correspondente (*UDF_Liu_2018.c*) é adicionado ao caso por meio da opção *Compiled UDFs*, na aba *User-Defined*, como ilustrado na Figura A.45.

Figura A.45 – Adição do arquivo de código-fonte da UDF (UDF_Liu_2018.c) ao caso.



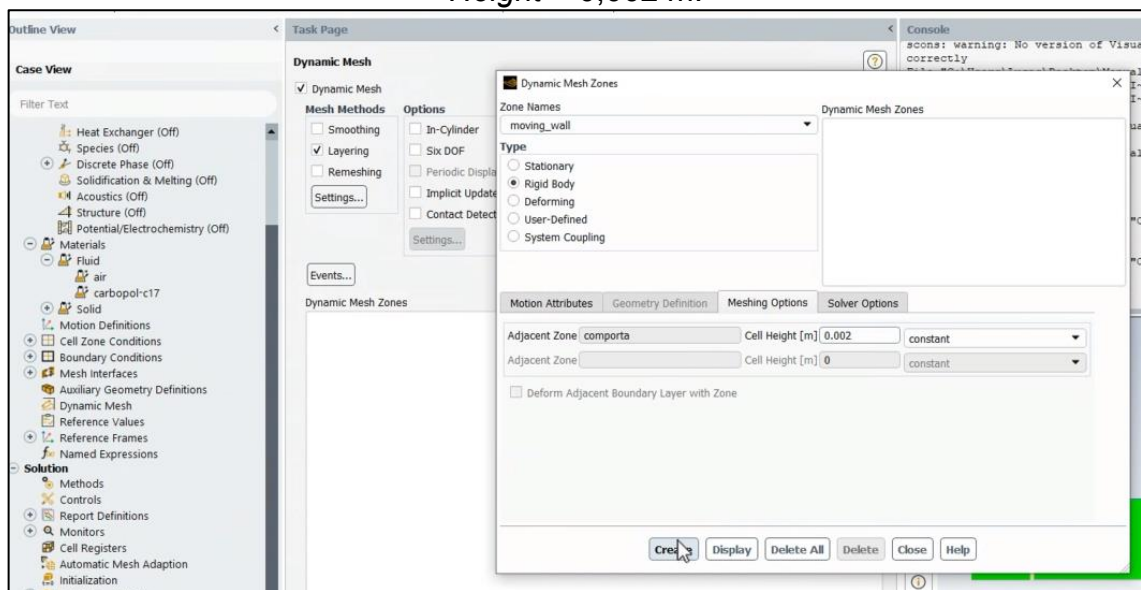
Em seguida, aciona-se o botão *Build*, que compila o código-fonte em C em uma biblioteca executável (*libudf*), utilizando o compilador integrado ao próprio *Fluent*. O console exibe o processo de compilação e indica eventuais erros de sintaxe; ao final, confirmando a mensagem *Done.*, a biblioteca é carregada no caso por meio do botão *Load*, como apresentado na Figura A.46. É importante destacar que esse processo deve ser repetido sempre que o código-fonte da UDF for modificado.

Figura A.46 – Compilação (*Build*) e carregamento (*Load*) da biblioteca da UDF.



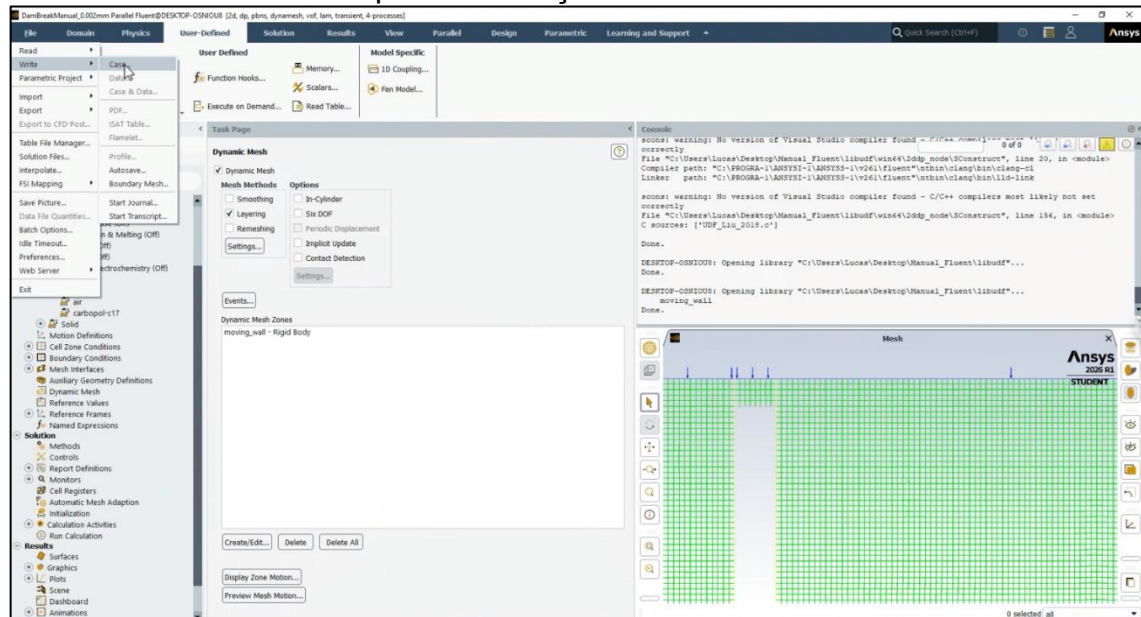
Com a *UDF* carregada, define-se a zona dinâmica correspondente à comporta. Em *Dynamic Mesh > Create/Edit...*, seleciona-se, em *Zone Names*, a zona *moving_wall*, define-se o tipo de movimento como *Rigid Body* e, na aba *Meshing Options*, informa-se o tamanho de célula adjacente (*Cell Height*) igual a 0,002 m (mesmo valor do tamanho global de elemento definido na geração da malha), garantindo a compatibilidade entre a malha original e a técnica de *Layering*, como ilustrado na Figura A.47.

Figura A.47 – Definição da zona dinâmica *moving_wall* como *Rigid Body*, com *Cell Height* = 0,002 m.



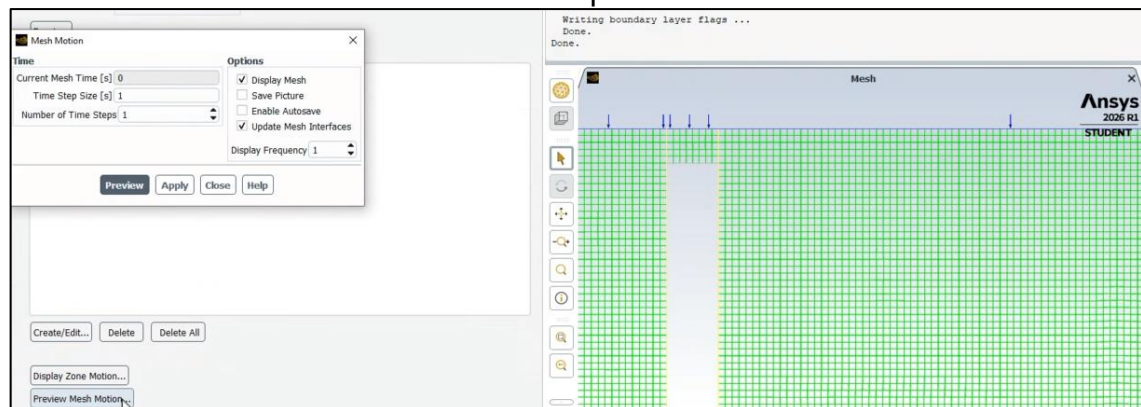
Antes de testar o movimento da malha, é fundamental salvar o caso (*File > Write > Case...*), uma vez que a operação de pré-visualização do movimento (*Preview Mesh Motion*) efetivamente desloca a malha; e, diferentemente de uma simples alteração de parâmetros, esse processo não pode ser desfeito. A Figura A.48 ilustra a zona *moving_wall* já criada na lista de *Dynamic Mesh Zones*, o console confirmando o carregamento da biblioteca da *UDF* para essa zona, e o menu *File > Write > Case...* sendo acessado.

Figura A.48 – Confirmação da zona *moving_wall* criada e salvamento do caso antes da pré-visualização do movimento.



Com o caso salvo, utiliza-se a opção *Preview Mesh Motion...*, na qual se define o *Time Step Size* e o *Number of Time Steps* a serem simulados apenas para fins de visualização do movimento da malha, sem resolver as equações do escoamento, como ilustrado na Figura A.49.

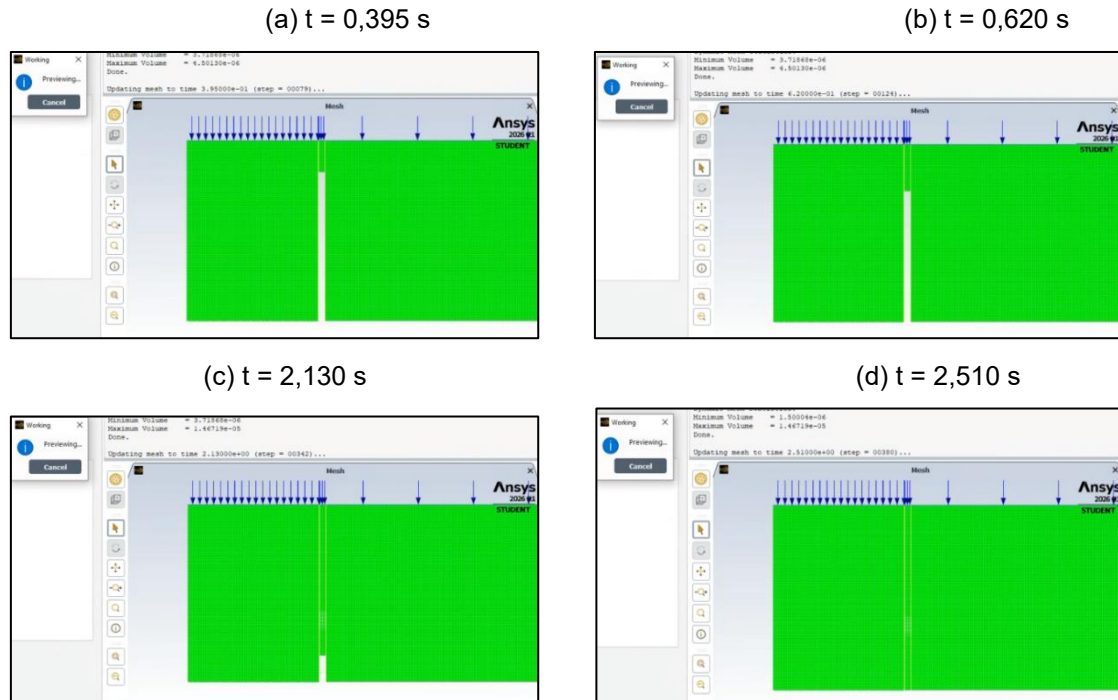
Figura A.49 – Caixa de diálogo *Mesh Motion* para pré-visualização do deslocamento da comporta.



A Figura A.50 apresenta quatro instantes da pré-visualização do movimento da malha, evidenciando a abertura progressiva da comporta ao longo do tempo simulado,

desde o início do movimento, em (a), até a comporta quase totalmente recolhida, em (d).

Figura A.50 – Pré-visualização do movimento da malha em diferentes instantes de tempo.

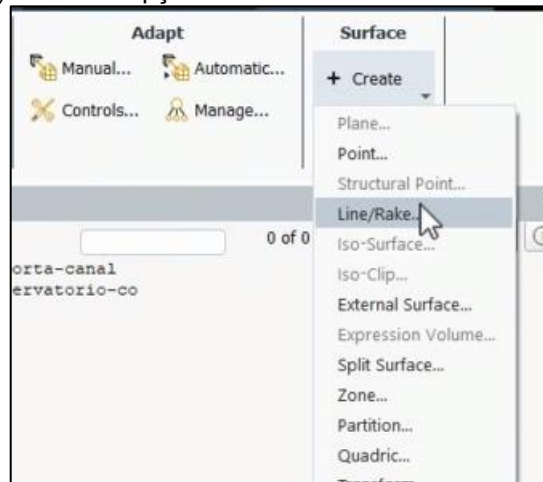


A.5.5 Definição de Monitores e Arquivos de Relatório

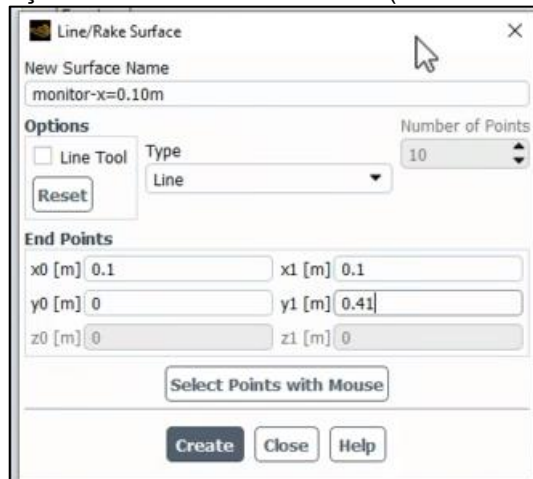
Para acompanhar a evolução do escoamento ao longo da simulação, definem-se dois monitores, seguindo a mesma abordagem adotada por Liu (2018): um monitor da altura do fluido em uma posição fixa do domínio, e um monitor da posição da frente de avanço do escoamento ao longo do tempo.

Para o monitor de altura, cria-se uma linha vertical atravessando o domínio em $x = 0.10 \text{ m}$, na aba *Surface > Create > Line/Rake...*, definindo-se as coordenadas dos pontos extremos da linha, no caso, de $(0,10; 0)$ a $(0,10; 0,41) \text{ m}$, podendo-se também atribuir um nome à superfície criada, como *monitor- $x=0.10\text{m}$* , conforme ilustrado na Figura A.51.

Figura A.51 – Criação da superfície de monitoramento (linha vertical em $x = 0,10 \text{ m}$).
 (a) acesso à opção *Surface > Create > Line/Rake...*

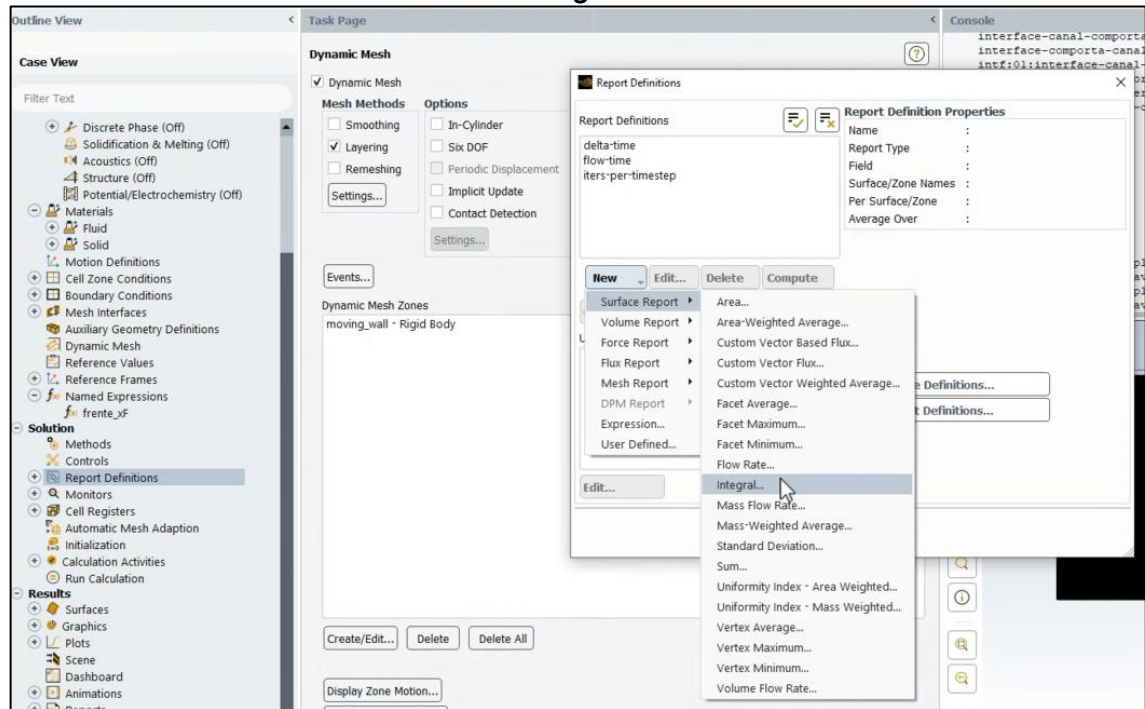


(b) definição das coordenadas da linha (*Line/Rake Surface*).



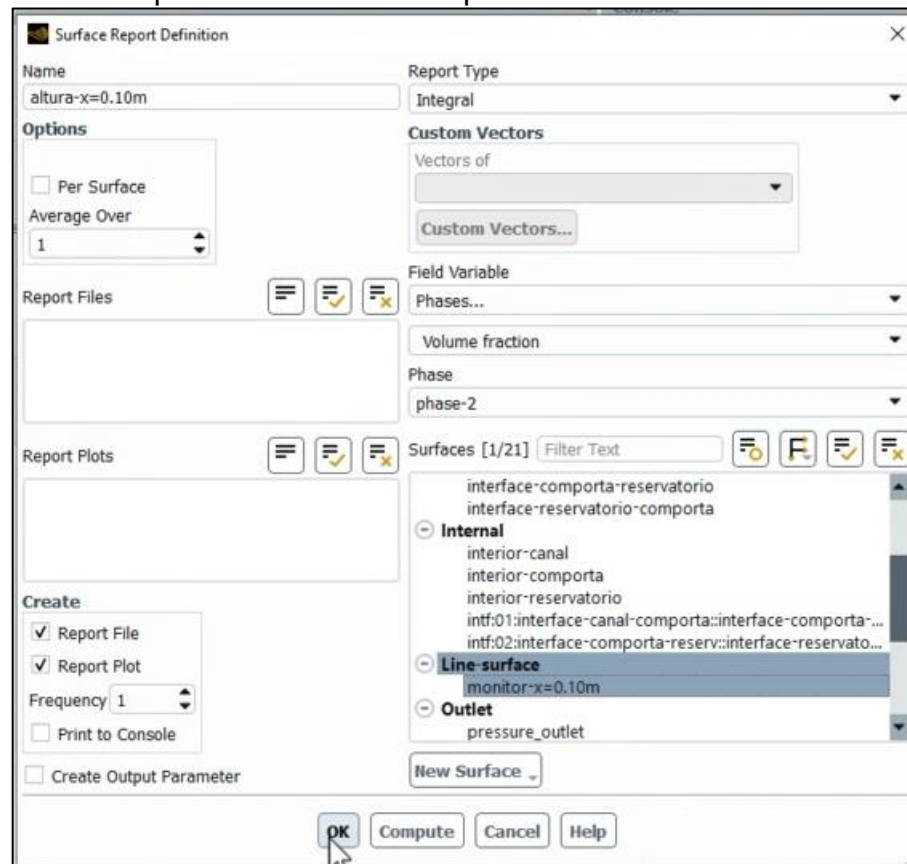
Em seguida, cria-se a definição de relatório correspondente, em *Report Definitions > New > Surface Report > Integral...*, como indicado na Figura A.52.

Figura A.52 – Criação de uma nova definição de relatório do tipo *Surface Report* > *Integral*.



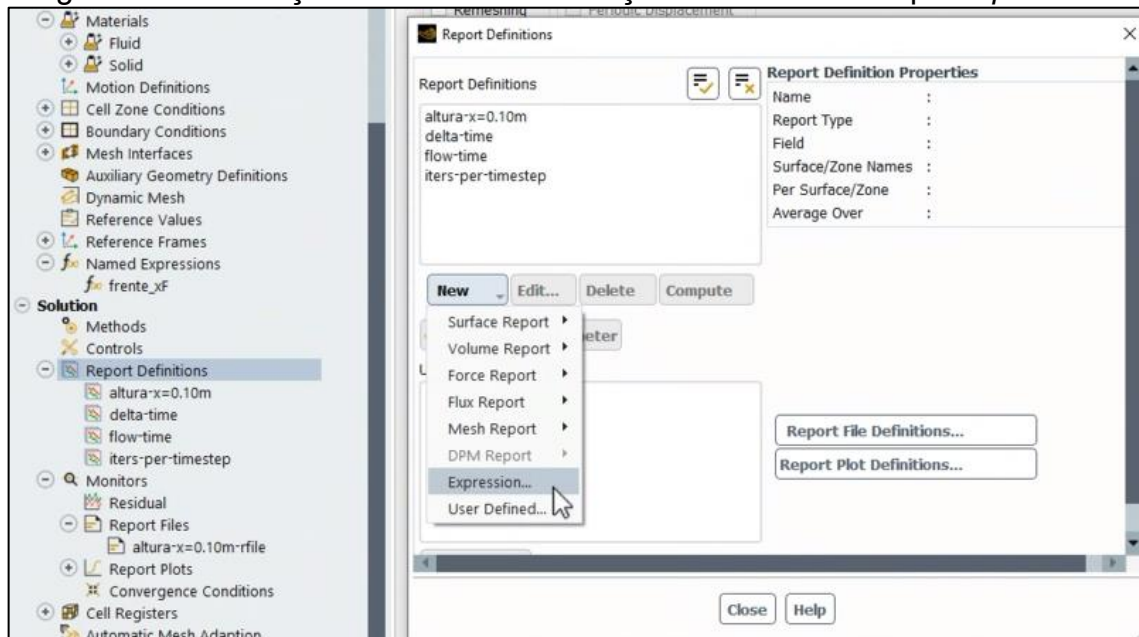
Na caixa de diálogo, define-se o *Field Variable* como *Phases... > Volume fraction*, selecionando-se a *Phase* igual a *phase-2* (Carbopol), e seleciona-se a linha criada anteriormente (*monitor-x=0.10m*) como superfície de referência para o cálculo da integral, como ilustrado na Figura A.53. Esse relatório fornece, a cada intervalo definido, a posição da interface ar-Carbopol ao longo da linha monitorada, ou seja, a altura do fluido naquela posição.

Figura A.53 – Definição do *Field Variable* (fração volumétrica da *phase-2*) e da superfície de referência para o monitor de altura.



Já para o monitor da frente de avanço do escoamento, em vez de uma superfície fixa, utiliza-se uma grandeza calculada sobre todo o domínio, definida por meio da opção *Report Definitions > New > Expression...*, como indicado na Figura A.54.

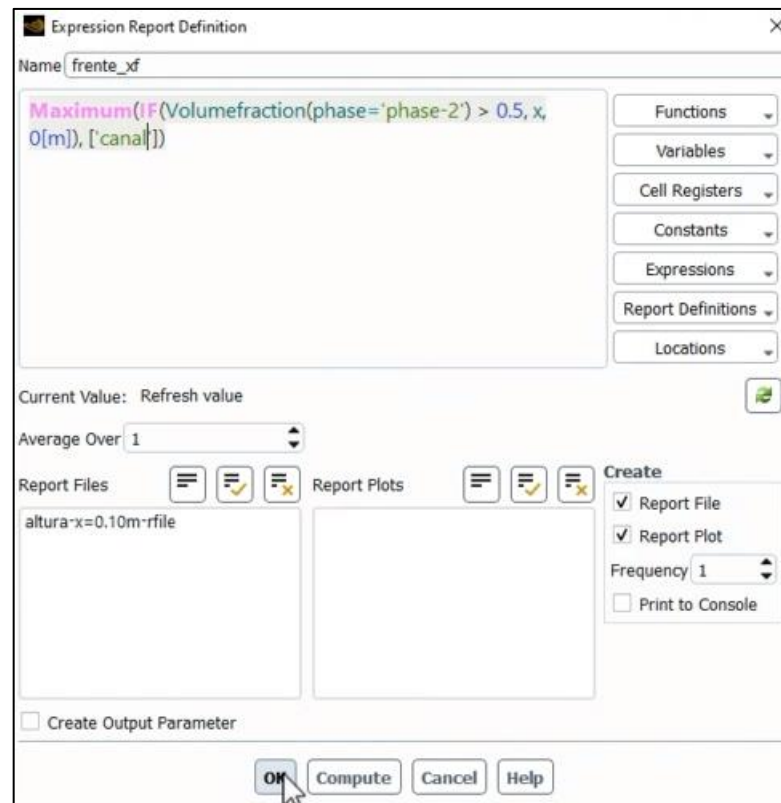
Figura A.54 – Criação de uma nova definição de relatório do tipo *Expression*.



Nessa definição, insere-se a expressão que determina a posição x mais avançada em que a fração volumétrica da *phase-2* supera 0,5, restrita à região do canal, conforme a Figura A.55:

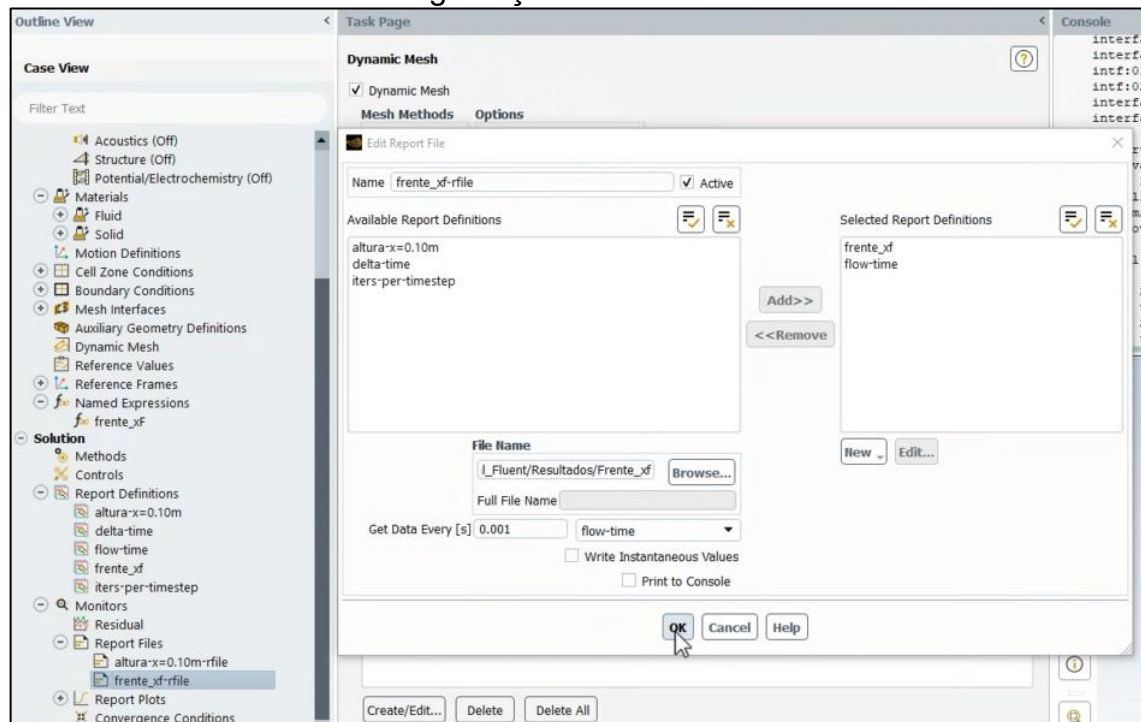
$$frente_{xf} = \text{Maximum}(\text{IF}(\text{Volumefraction}(\text{phase} = 'phase - 2') > 0.5, x, 0[m]), ['canal'])$$

Figura A.55 – Definição da expressão *frente_xf*, utilizada para o monitoramento da frente de avanço do escoamento.



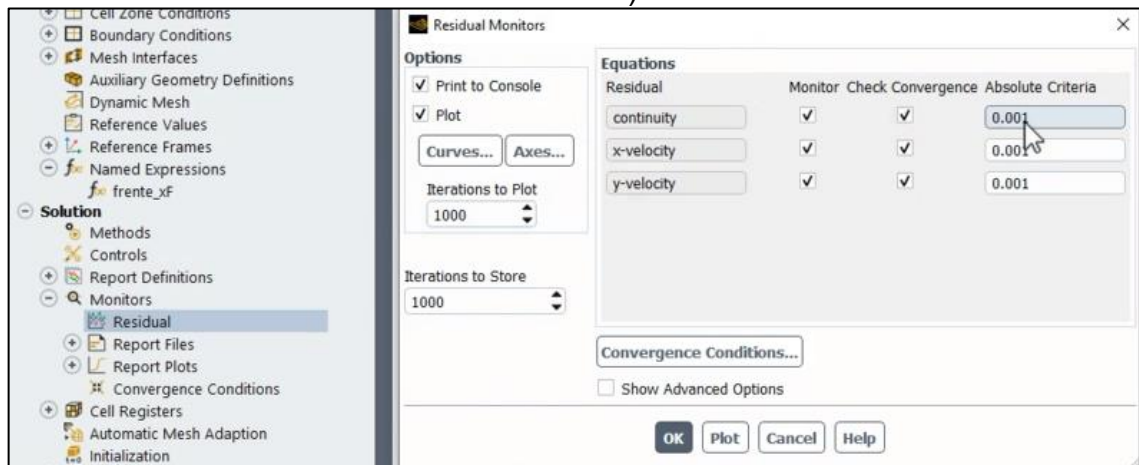
Por fim, em *Report Files*, define-se o local de salvamento dos arquivos correspondentes a cada um dos dois monitores, bem como a frequência de gravação dos dados, na opção *Get Data Every*, que pode ser especificada em *Flow Time*, *Time Step* ou *Iteration*, como ilustrado na Figura A.56.

Figura A.56 – Configuração do arquivo de relatório (*Report File*) e da frequência de gravação dos dados.



Por fim, configuram-se os resíduos (*Residuals*), na aba *Monitors*. Os resíduos representam uma medida numérica do desequilíbrio remanescente nas equações discretizadas de conservação (continuidade e quantidade de movimento) a cada iteração: quanto mais próxima de zero uma solução estiver de satisfazer essas equações, menor será o resíduo associado a ela. Por se tratar de um critério relativo (normalizado em relação aos valores do início da simulação ou da iteração anterior, dependendo da formulação), considera-se que a solução convergiu, em determinada iteração, quando os resíduos de todas as variáveis monitoradas caem abaixo de um critério pré-estabelecido. Neste trabalho, adota-se o critério de convergência de 10^{-3} para os resíduos de continuidade e das velocidades x e y, mesmo valor utilizado por Liu (2018), como apresentado na Figura A.57. Vale notar que esse critério é relativamente permissivo quando comparado a simulações monofásicas convencionais (nas quais é comum adotar 10^{-4} ou inferior).

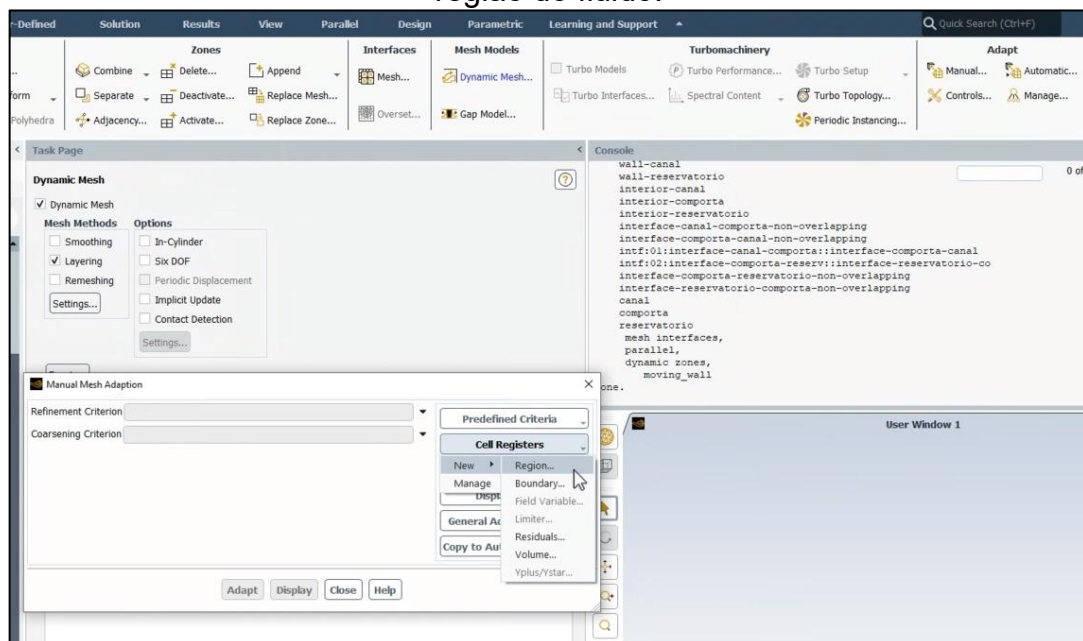
Figura A.57 – Configuração dos critérios de convergência dos resíduos (*Residual Monitors*).



A.5.6 Inicialização e Definição da Região do Fluido

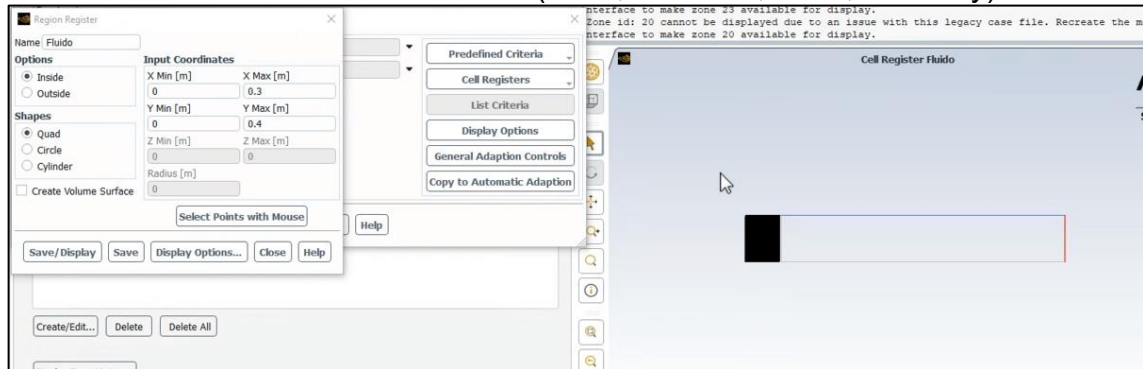
A última etapa da configuração consiste em definir a região do domínio inicialmente preenchida pelo fluido (Carbopol), correspondente ao reservatório antes da abertura da comporta. Para isso, utiliza-se a ferramenta de adaptação manual de malha, em *Adapt > Manual...*, acessando-se *Cell Registers > New > Region...*, como indicado na Figura A.58.

Figura A.58 – Acesso à opção *Cell Registers > New > Region...*, para a criação da região do fluido.



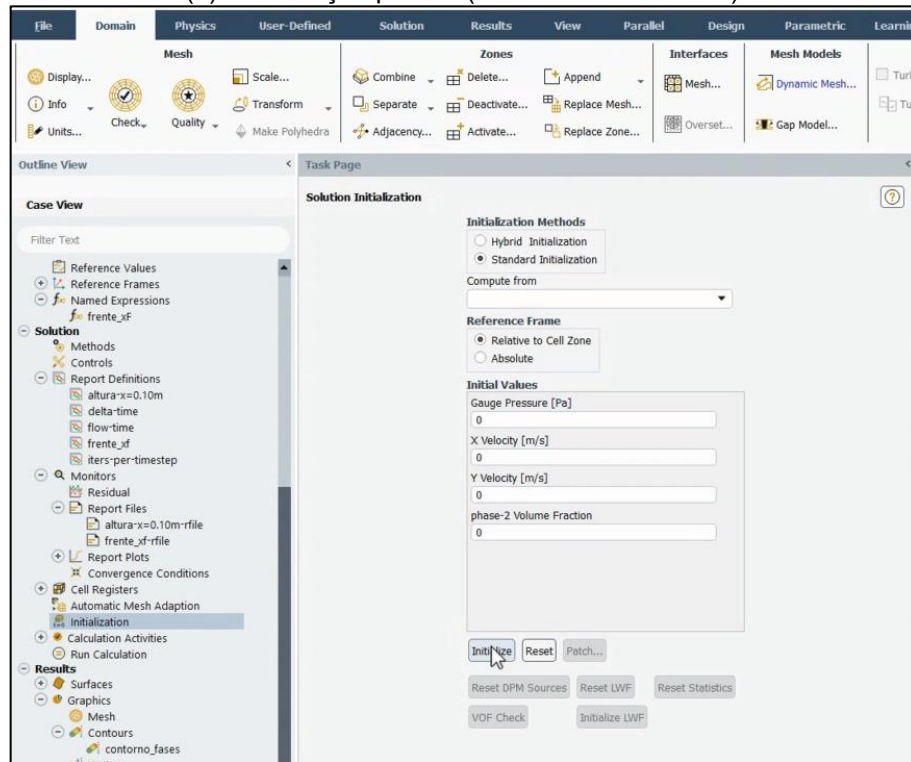
Na caixa de diálogo *Region Register*, nomeada neste trabalho como *Fluido*, define-se uma região do tipo *Quad*, com coordenadas de 0 a 0,3 m em x e de 0 a 0,4 m em y (compatível com as dimensões do reservatório estabelecidas na etapa de construção da geometria), como ilustrado na Figura A.59.

Figura A.59 – Definição da região *Fluido*, com coordenadas correspondentes às dimensões do reservatório (0 a 0,3 m em x; 0 a 0,4 m em y).

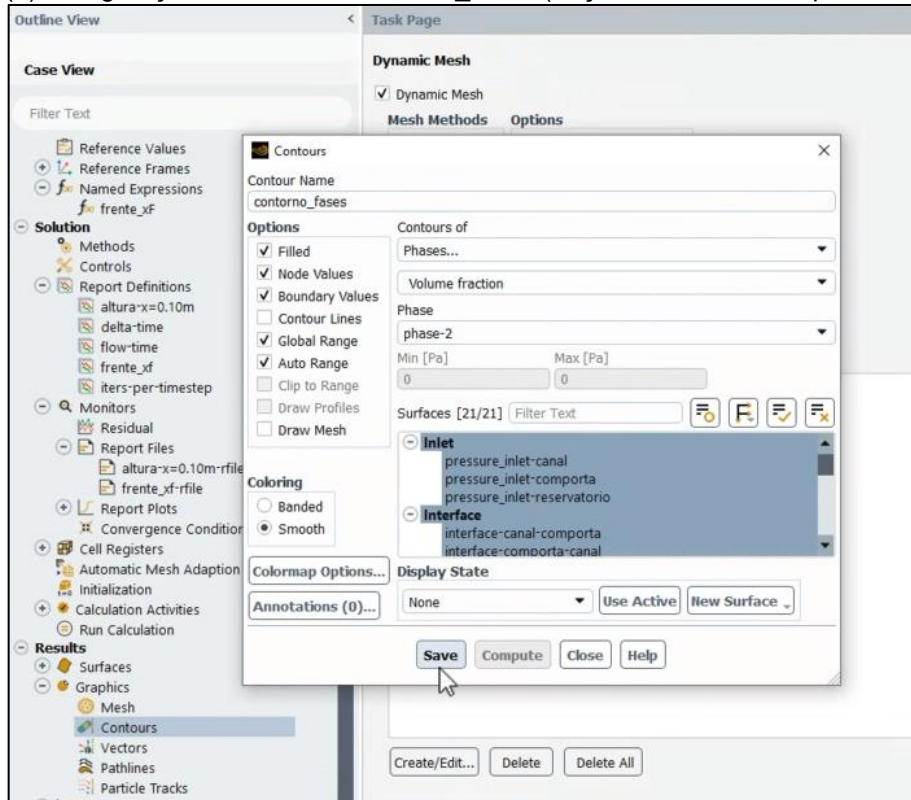


Antes de aplicar a condição inicial sobre essa região, é necessário inicializar o caso, na aba *Initialization*, utilizando o método *Standard Initialization* e mantendo os valores iniciais padrão (nulos). Aproveita-se também esse momento para configurar, em *Graphics > Contours...*, um contorno (nomeado *contorno_fases*) do tipo *Phases... > Volume fraction* para a *phase-2*, que será utilizado mais adiante para visualizar a distribuição das fases no domínio. A Figura A.60 ilustra ambas as etapas: em (a), a inicialização padrão do caso; e, em (b), a configuração do contorno de fases.

Figura A.60 – Inicialização do caso e configuração do contorno de fases.
(a) inicialização padrão (*Standard Initialization*).

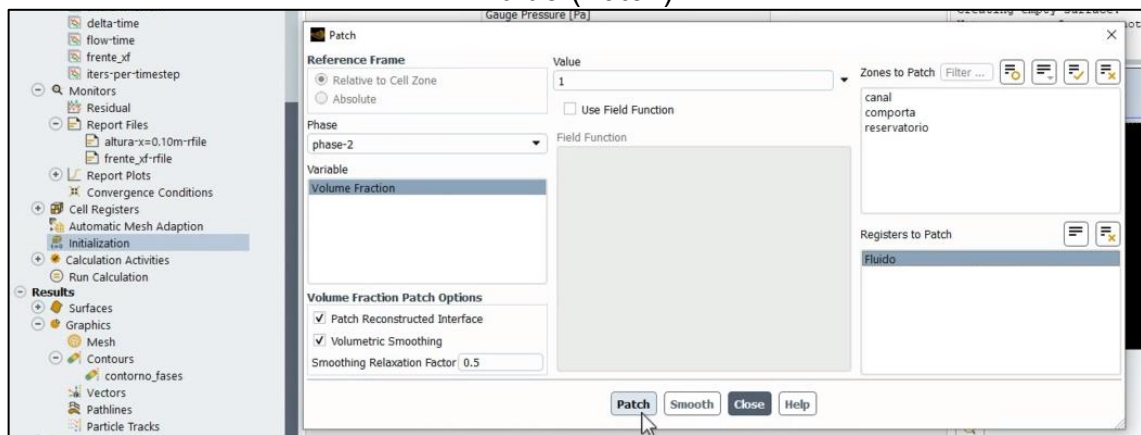


(b) configuração do contorno *contorno_fases* (fração volumétrica da *phase-2*).



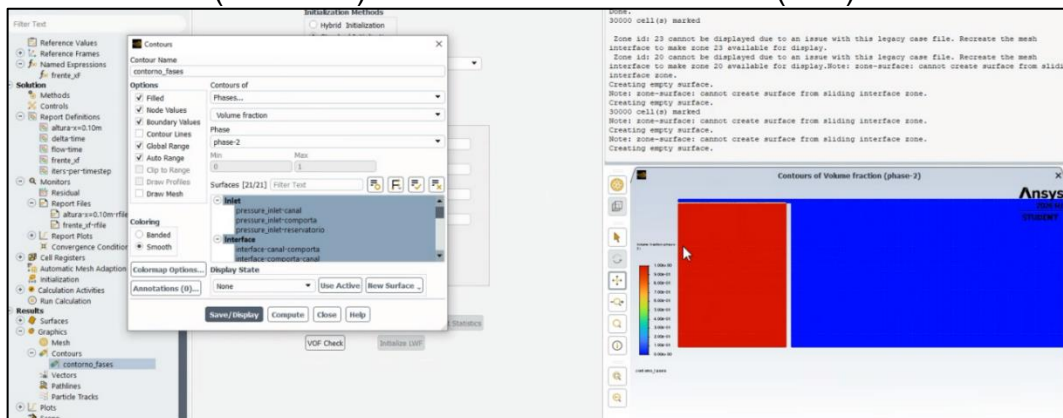
Com o caso inicializado, aplica-se, em *Initialization > Patch...*, a condição de fração volumétrica igual a 1 para a *phase-2* na região *Fluido* criada anteriormente, como ilustrado na Figura A.61. Esse procedimento (*patching*) estabelece a condição inicial do problema: o reservatório preenchido com Carbopol, e o restante do domínio (comporta e canal) preenchido com ar.

Figura A.61 – Aplicação da fração volumétrica igual a 1 para a *phase-2* na região *Fluido* (*Patch*).



Por fim, ao salvar e exibir novamente o contorno *contorno_fases* criado anteriormente, é possível visualizar a condição inicial estabelecida: a região do reservatório com fração volumétrica igual a 1 (Carbopol, em vermelho) e o restante do domínio com fração volumétrica igual a 0 (ar, em azul), como ilustrado na Figura A.62, confirmando que a condição inicial foi corretamente aplicada antes do início do cálculo.

Figura A.62 – Visualização da condição inicial das fases: Carbopol no reservatório (vermelho) e ar no restante do domínio (azul).

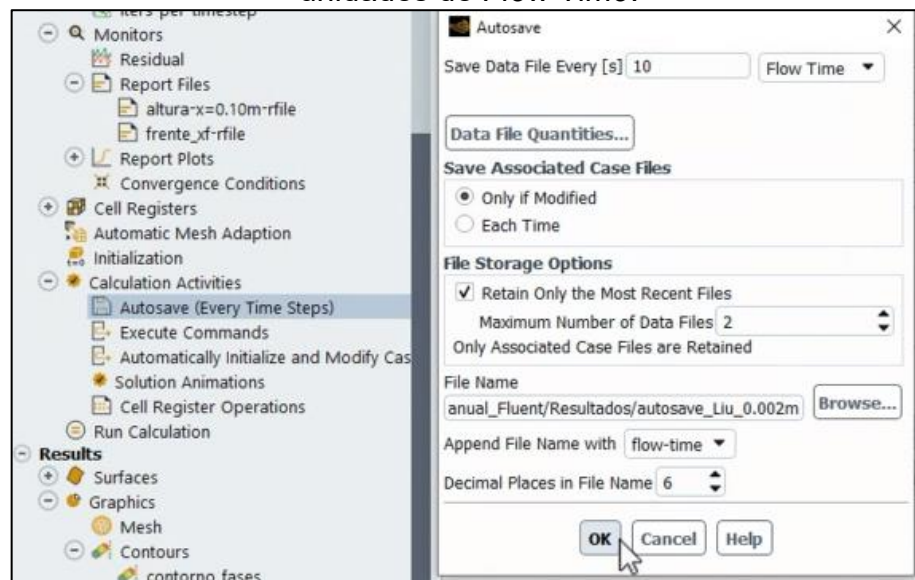


A.6 Calculation Activities

Antes de iniciar o cálculo propriamente dito, configuram-se algumas rotinas automáticas em *Calculation Activities*, de forma a tornar a simulação mais robusta frente a eventuais interrupções e a facilitar o pós-processamento posterior.

A primeira delas é o *Autosave*, que salva automaticamente o arquivo de dados (.dat.h5) a cada intervalo definido, podendo ser especificado em iterações, *time steps* ou *flow time*. Essa rotina é essencial em simulações longas e computacionalmente custosas, como é o caso deste trabalho: caso ocorra alguma falha durante o processamento (queda de energia, erro do solver, encerramento inesperado do programa etc.), o caso pode ser retomado a partir do último arquivo salvo, em vez de reiniciado do zero. Neste trabalho, define-se o salvamento a cada 10 unidades de *Flow Time*, habilitando-se também a opção *Retain Only the Most Recent Files*, que limita o número de arquivos de dados mantidos em disco (neste caso, 2), evitando o consumo excessivo de espaço de armazenamento, como ilustrado na Figura A.63. Esse número pode ser ampliado caso se deseje manter um histórico mais longo de pontos de retomada.

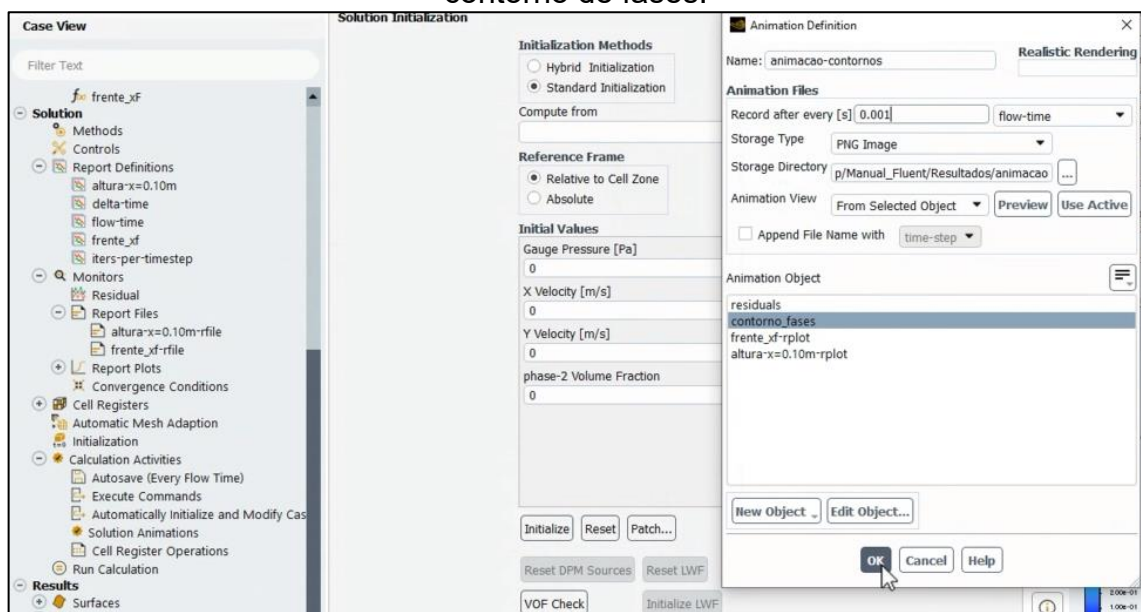
Figura A.63 – Configuração do salvamento automático (*Autosave*) a cada 10 unidades de *Flow Time*.



Também é possível salvar automaticamente imagens dos contornos definidos anteriormente, por meio da opção *Solution Animations*. Essa ferramenta gera uma

sequência de imagens (ou outros formatos de animação) do objeto gráfico selecionado (neste caso, o contorno *contorno_fases*), registrada em intervalos regulares de tempo de simulação, permitindo reconstruir, ao final do processamento, uma animação da evolução do escoamento sem a necessidade de reabrir o caso no *Fluent* para gerar cada quadro manualmente. Define-se o intervalo de gravação (neste caso, a cada 0,001 s de *flow time*), o formato de armazenamento (*PNG Image*) e o diretório de destino, como ilustrado na Figura A.64.

Figura A.64 – Configuração da animação de solução (*Solution Animation*) para o contorno de fases.



Por fim, na aba *Run Calculation*, definem-se os parâmetros que controlam a execução do cálculo:

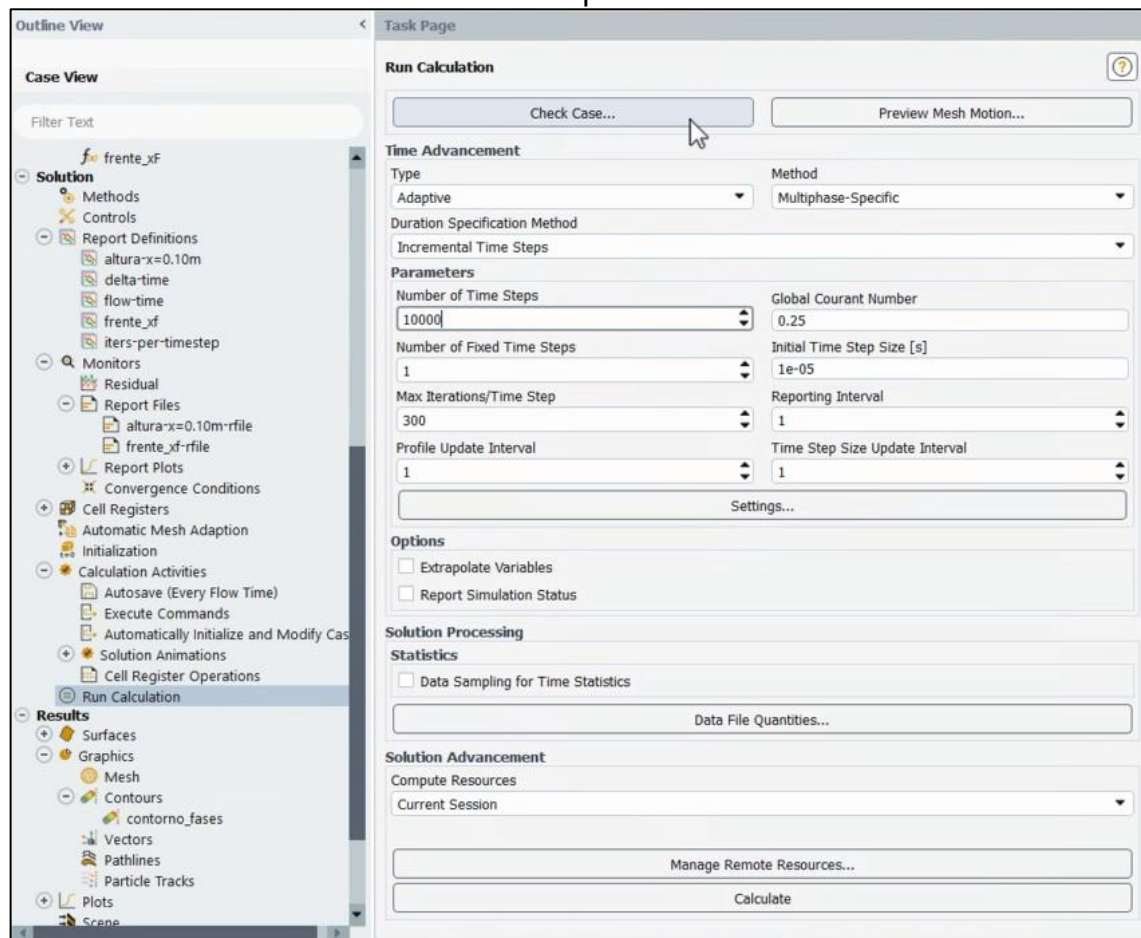
- *Number of Time Steps*: define a quantidade total de passos de tempo a serem calculados (neste caso, 10.000). Como o passo de tempo é adaptativo, esse número não corresponde diretamente ao tempo físico total simulado, que depende de como o passo de tempo evolui ao longo do cálculo;
- *Global Courant Number*: parâmetro central do controle adaptativo do passo de tempo (*Adaptive*, método *Multiphase-Specific*). O número de Courant relaciona o passo de tempo ao tamanho da célula e à velocidade local do escoamento, controlando a distância que o fluido pode atravessar uma célula em um único passo de tempo. Valores mais baixos (neste caso, 0,25) resultam em passos

de tempo menores e mais conservadores, o que aumenta a estabilidade do cálculo.

- *Max Iterations/Time Step*: número máximo de iterações que o solver pode realizar dentro de um mesmo passo de tempo até que o critério de convergência dos resíduos seja atingido (neste caso, 300). Caso esse limite seja alcançado sem convergência, o *Fluent* avança para o próximo passo de tempo mesmo assim, o que pode ser um indício de instabilidade numérica caso ocorra com frequência ao longo do cálculo.

A Figura A.65 apresenta o painel completo de configuração da execução do cálculo, com os parâmetros descritos acima. É importante mencionar que, por trás da opção de passo de tempo adaptativo, o botão *Settings...* disponibiliza controles adicionais, entre eles, o tamanho máximo permitido para o passo de tempo (*Maximum Time Step Size*). Recomenda-se fortemente configurar esse limite máximo de forma explícita, e não depender apenas do número de Courant, já que, em situações de baixa velocidade local (como no início do escoamento, antes da abertura completa da comporta), o passo de tempo adaptativo pode crescer além do que a malha dinâmica da comporta é capaz de acomodar entre um passo e outro, resultando em erro de geração de malha. Por fim, aciona-se o botão *Calculate* para dar início ao processamento.

Figura A.65 – Painei *Run Calculation*, com a configuração do passo de tempo adaptativo, do número de Courant e do número máximo de iterações por passo de tempo.

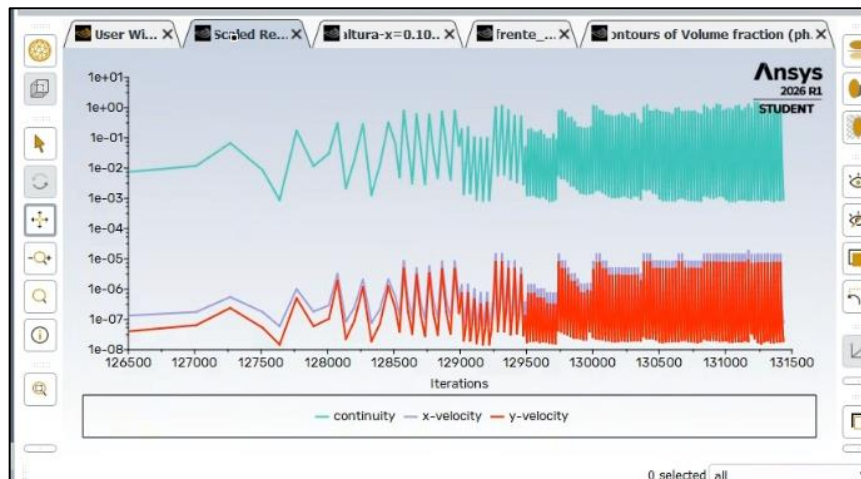


A.7 Pós-processamento

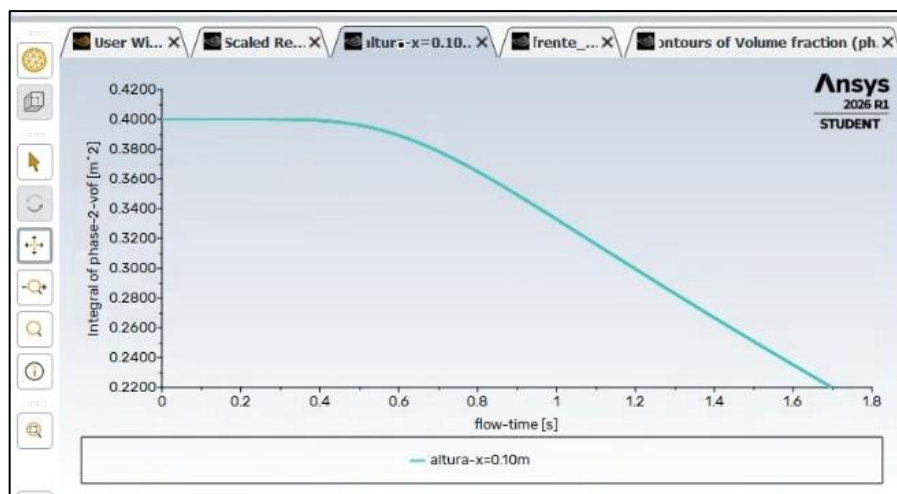
Durante a execução da simulação, é possível acompanhar em tempo real diversos indicadores de monitoramento, conforme apresentado na Figura A.66: em (a), a evolução dos resíduos de continuidade e das velocidades; em (b), o *report plot* da integral da fração volumétrica na altura $x = 0,10$ m; em (c), o contorno da fração volumétrica das fases, indicando o avanço da frente de fluido; e, em (d), o *report plot* da posição da frente de onda, todos atualizados a cada passo de tempo, o que permite verificar a convergência da solução e acompanhar o comportamento físico do escoamento.

Figura A.66 – Monitoramento da simulação no *Fluent*: resíduos, *report plots* e contornos da fração volumétrica.

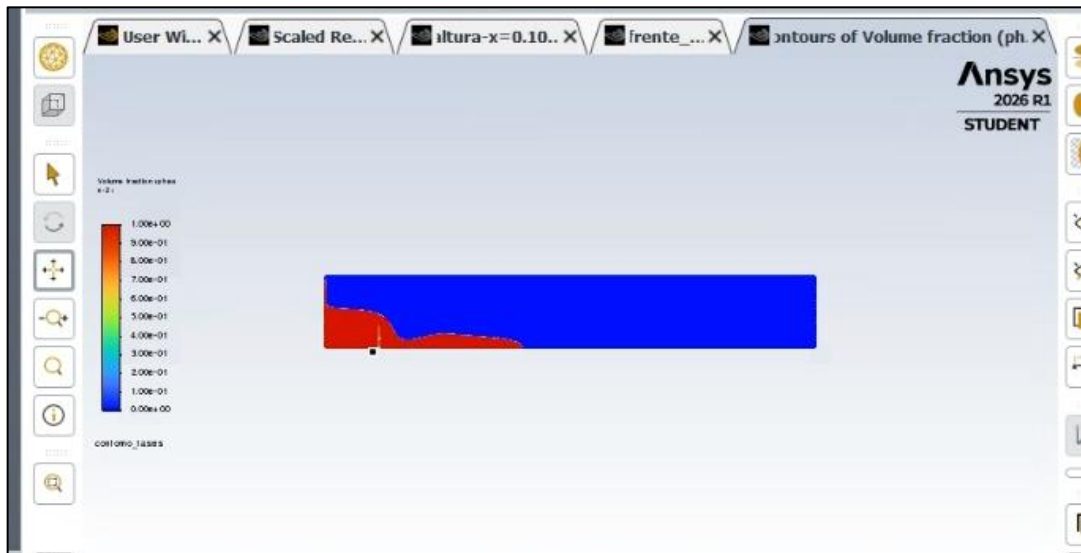
(a) evolução dos resíduos de continuidade e das velocidades (x e y).



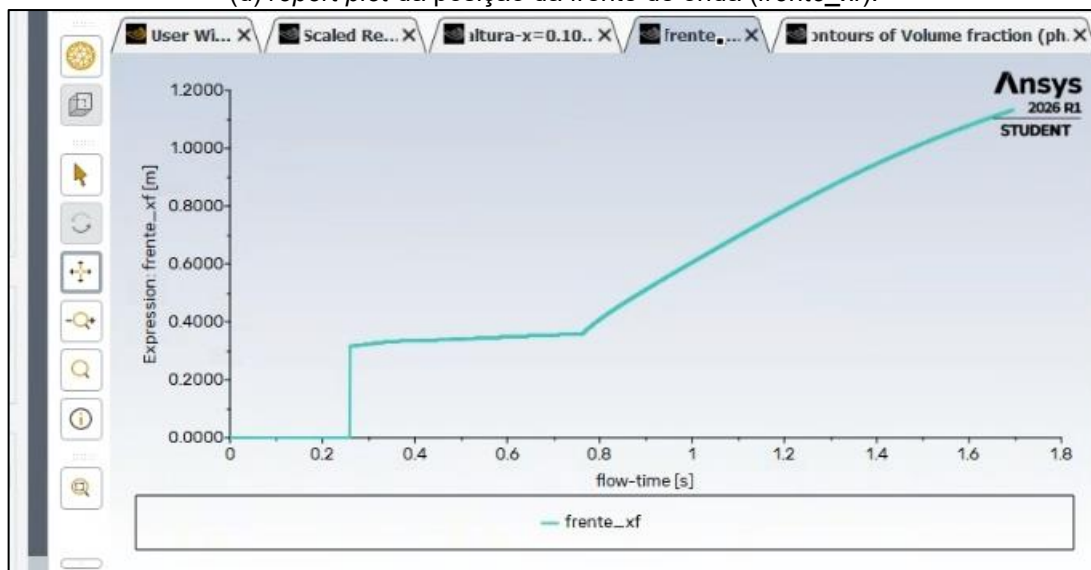
(b) report plot da integral da fração volumétrica da fase 2 (Carbopol) na altura $x = 0,10$ m.



(c) contorno da fração volumétrica das fases, indicando o avanço da frente de fluido.



(d) report plot da posição da frente de onda (*frente_xf*).



Os arquivos gerados pelo *Fluent* são salvos automaticamente na pasta definida pelo usuário para armazenamento dos resultados. Esses arquivos são exportados no formato *.out*, que corresponde a um arquivo de texto simples (ASCII) contendo os dados numéricos registrados ao longo da simulação para cada monitor (resíduo, *report file* ou *report plot*) definido previamente na configuração do caso. Por se tratar

de um arquivo de texto puro, ele pode ser aberto diretamente no Bloco de Notas ou em qualquer editor de texto, sem necessidade de softwares específicos. Sua estrutura é organizada em colunas, contendo o número da iteração (*time-step*), a grandeza monitorada definida para o estudo (por exemplo, a posição da frente de onda) e o tempo físico da simulação (*flow-time*), conforme ilustrado nas Figuras A.67 e A.68.

Figura A.67 – Arquivo de saída *frente_xf.out*, referente ao monitoramento da posição da frente de onda, aberto no Bloco de Notas.

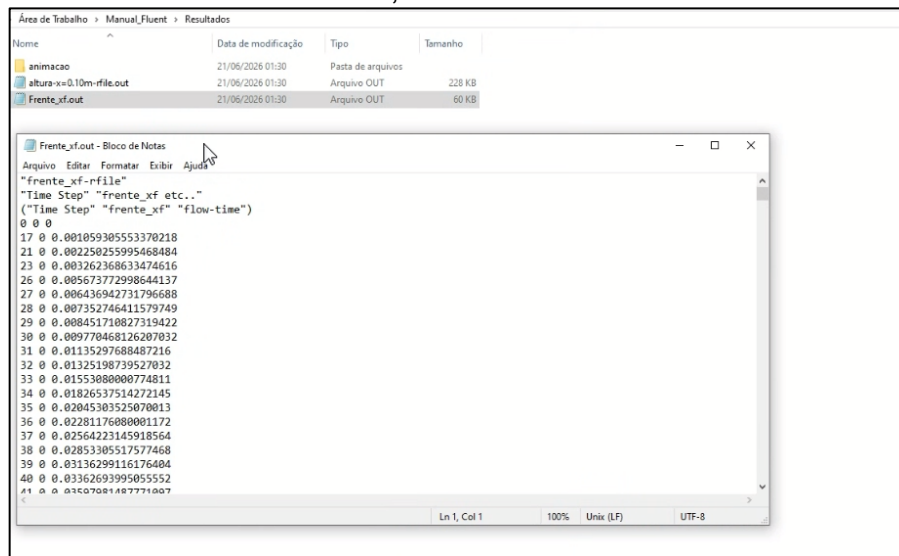
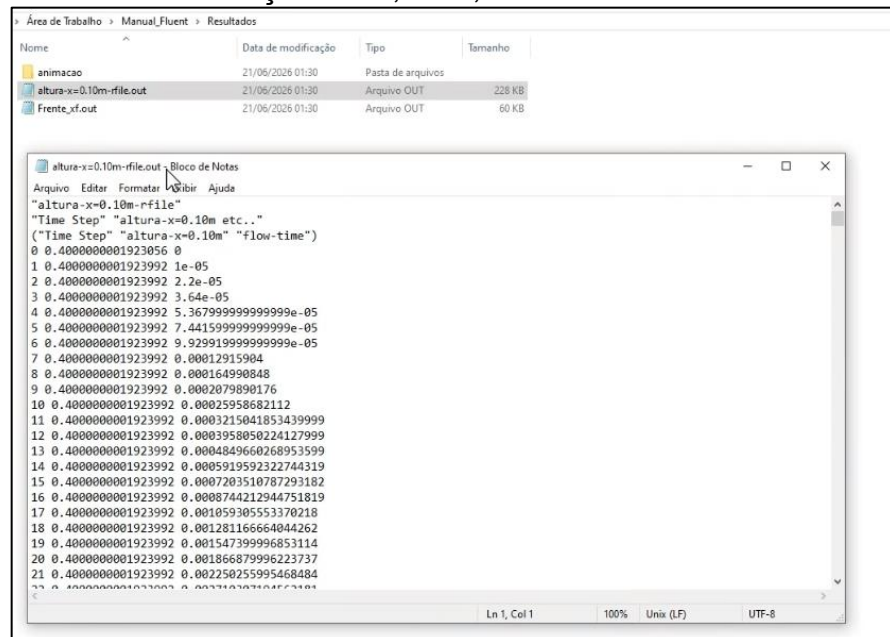


Figura A.68 – Arquivo de saída *altura-x=0.10m-rfile.out*, referente ao monitoramento da altura na seção $x = 0,10$ m, aberto no Bloco de Notas.



Para gerar os gráficos e demais resultados do pós-processamento a partir desses arquivos, pode-se utilizar alguma ferramenta de programação para auxiliar, como o *Python*.

Utilizaremos as bibliotecas *numpy* e *matplotlib*, para realizar os gráficos a partir dos arquivos .out gerados pelo Fluent, com o Código A.1 serão gerados dois gráficos, a frente x_f e o monitor de altura (Figuras A.69 e A.70) (é necessário atualizar os caminhos do arquivo para o respectivo diretório).

Figura A.69 – Frente de escoamento x_f x tempo obtida através do Código

A.1

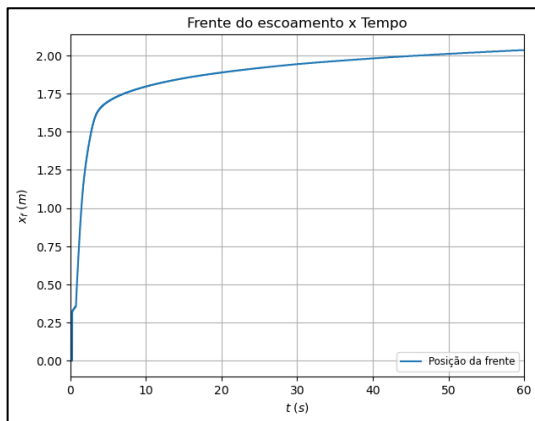
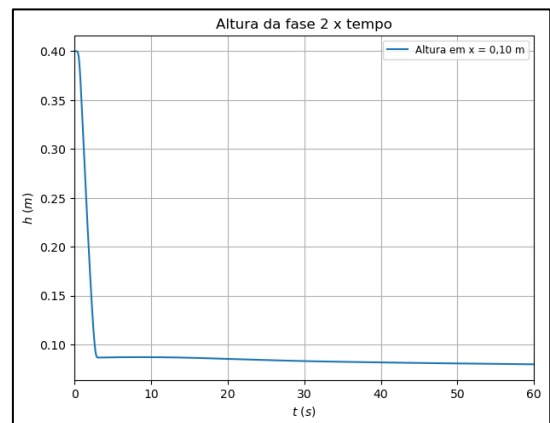


Figura A.70 – Altura da fase 2 x tempo (em $x = 0.10m$) obtida através do

Código A.1



Código A.1 – Script Python para geração dos resultados gráficos do caso de Liu (2018)

```

1  # =====
2  # Importação das bibliotecas
3  # =====
4
5  import numpy as np
6  import matplotlib.pyplot as plt
7
8  # =====
9  # Configurações do gráfico
10 # =====
11
12 FONT_SIZE = 8.5
13
14 # =====
15 # Caminhos dos arquivos de saída do ANSYS Fluent
16 # =====
17
18 CAMINHO_FRENTE = (
19     r"<diretório do arquivo Frente_xf.out>"
20 )
21
22 CAMINHO_ALTURA = (
23     r"<diretório do arquivo altura-x=0.10m-rfile.out>"
24 )
25
26 # =====
27 # Gráfico 1 – Posição da frente (xf) em função do tempo
28 # =====
29
30 dados_frente = np.loadtxt(CAMINHO_FRENTE, skiprows=3)
31
32 tempo_frente = dados_frente[:, 2]
33 posicao_frente = dados_frente[:, 1]
34
35 plt.figure()
36 plt.plot(tempo_frente, posicao_frente, label="Posição da frente")
37
38 plt.xlabel(r"$t$ (s)")
39 plt.ylabel(r"$x_f$ (m)")
40 plt.xlim(0, <tempo_final>)
41
42 plt.grid()
43 plt.legend(loc="lower right", prop={"size": FONT_SIZE})
44 plt.title("Frente do escoamento em função do tempo")

```

```
45 plt.tight_layout()
46
47 # =====
48 # Gráfico 2 - Altura da fase 2 em função do tempo
49 # =====
50
51 dados_altura = np.loadtxt(CAMINHO_ALTURA, skiprows=3)
52
53 tempo_altura = dados_altura[:, 2]
54 altura = dados_altura[:, 1]
55
56 plt.figure()
57 plt.plot(tempo_altura, altura, label="Altura em x = 0,10 m")
58
59 plt.xlabel(r"$t$ (s)")
60 plt.ylabel(r"$h$ (m)")
61 plt.xlim(0, 60)
62
63 plt.grid()
64 plt.legend(loc="upper right", prop={"size": FONT_SIZE})
65 plt.title("Altura da fase 2 em função do tempo")
66 plt.tight_layout()
67
68 plt.show()
```

APÊNDICE B – FUNÇÕES UDF’S UTILIZADAS PARA ABERTURAS DAS COMPORTAS NAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Código B.1 – Função UDF para abertura da comporta – caso de Liu (2018)

```

1  #include "udf.h"
2  #include "dynamesh_tools.h"
3
4  static real velocity = 0.0;
5
6  DEFINE_CG_MOTION(moving_wall,dt,vel,omega,time,dtime)
7  {
8      NV_S(vel,=,0.0);
9      NV_S(omega,=,0.0);
10     real flow_time = RP_Get_Real("flow-time");
11
12     if (flow_time <= 2.5)
13     {
14         vel[1] = -0.16;
15     }
16
17
18
19     else
20     {
21         vel[1] = 0.0;
22     }
23
24 }
```

Código B.2 – Função UDF para abertura da comporta – caso L1

```

1  #include "udf.h"
2  #include "dynamesh_tools.h"
3
4  static real velocity = 0.0;
5
6  DEFINE_CG_MOTION(moving_wall,dt,vel,omega,time,dtime)
7  {
8      NV_S(vel,=,0.0);
9      NV_S(omega,=,0.0);
10     real flow_time = RP_Get_Real("flow-time");
11
12     if (flow_time <= 13.73626373626374)
13     {
14         vel[1] = -0.0091;
15     }
```

```

16
17
18
19 else
20 {
21 vel[1] = 0.0;
22 }
23
24 }

```

Código B.3 – Função UDF para abertura da comporta – caso L2

```

1 #include "udf.h"
2 #include "dynamesh_tools.h"
3
4 /* L2-0 | v = 0.0091 m/s | 126 → 62,5 → 0 mm
5   Pausa de 10 s em cada estágio
6   126 mm → 62,5 mm : 0.000 até 6.978 s
7   pausa 62,5 mm      : 6.978 até 16.978 s
8   62,5 mm → 0 mm    : 16.978 até 23.846 s */
9
10 DEFINE_CG_MOTION(moving_wall, dt, vel, omega, time, dtime)
11 {
12     NV_S(vel, =, 0.0);
13     NV_S(omega, =, 0.0);
14
15     real ft = time;
16
17     if (ft <= 6.978)
18         vel[1] = -0.0091; /* 126 mm → 62,5 mm */
19     else if ((ft > 16.978) && (ft <= 23.846))
20         vel[1] = -0.0091; /* 62,5 mm → 0 mm */
21     else
22         vel[1] = 0.0;
23 }

```

Código B.4 – Função UDF para abertura da comporta – caso C1-CI-4

```

1 #include "udf.h"
2 #include "dynamesh_tools.h"
3
4 static real velocity = 0.0;
5
6 DEFINE_CG_MOTION(moving_wall, dt, vel, omega, time, dtime)
7 {
8     NV_S(vel, =, 0.0);
9     NV_S(omega, =, 0.0);

```

```

10     real flow_time = RP_Get_Real("flow-time");
11
12     if (flow_time <= 13.73626373626374)
13     {
14     vel[1] = -0.0091;
15     }
16
17
18
19     else
20     {
21     vel[1] = 0.0;
22     }
23
24     }

```

Código B.5 – Função UDF para abertura da comporta – caso C2-CI-4

```

1  #include "udf.h"
2  #include "dynamesh_tools.h"
3
4  /* C2-CI-4 | v = 0.0091 m/s | 126 → 75 → 25 → 0 mm
5     Pausa de 20 s em cada estágio
6
7     126 mm → 75 mm : 0.000 até 5.604 s
8     pausa 75 mm : 5.604 até 25.604 s
9     75 mm → 25 mm : 25.604 até 31.100 s
10    pausa 25 mm : 31.100 até 51.100 s
11    25 mm → 0 mm : 51.100 até 53.846 s          */
12
13  DEFINE_CG_MOTION(moving_wall, dt, vel, omega, time, dtime)
14  {
15      NV_S(vel, =, 0.0);
16      NV_S(omega, =, 0.0);
17
18      real ft = time;
19
20      if (ft <= 5.604)
21          vel[1] = -0.0091;          /* 126 mm → 75 mm */
22
23      else if ((ft > 25.604) && (ft <= 31.100))
24          vel[1] = -0.0091;          /* 75 mm → 25 mm */
25
26      else if ((ft > 51.100) && (ft <= 53.846))
27          vel[1] = -0.0091;          /* 25 mm → 0 mm */
28
29      else

```

```

30     vel[1] = 0.0;
31 }

```

Código B.6 – Função UDF para abertura da comporta – caso C3-CI-4

```

1  #include "udf.h"
2  #include "dynamesh_tools.h"
3
4  /* C3-CI-4 | v = 0.0091 m/s | 126 → 62,5 → 0 mm
5     Pausa de 20 s em cada estágio
6
7     126 mm → 62,5 mm : 0.000 até 6.978 s
8     pausa 62,5 mm      : 6.978 até 26.978 s
9     62,5 mm → 0 mm    : 26.978 até 33.846 s */
10
11 DEFINE_CG_MOTION(moving_wall, dt, vel, omega, time, dtime)
12 {
13     NV_S(vel, =, 0.0);
14     NV_S(omega, =, 0.0);
15
16     real ft = time;
17
18     if (ft <= 6.978)
19         vel[1] = -0.0091;      /* 126 mm → 62,5 mm */
20
21     else if ((ft > 26.978) && (ft <= 33.846))
22         vel[1] = -0.0091;      /* 62,5 mm → 0 mm */
23
24     else
25         vel[1] = 0.0;
26 }

```

Código B.7 – Função UDF para abertura da comporta – caso C4-CI-4

```

1  #include "udf.h"
2  #include "dynamesh_tools.h"
3
4  DEFINE_CG_MOTION(moving_wall, dt, vel, omega, time, dtime)
5  {
6     NV_S(vel, =, 0.0);
7     NV_S(omega, =, 0.0);
8
9     real ft = time;
10
11     if (ft <= 2.857)
12         vel[1] = -0.0091;
13

```

```
14     else if ((ft > 22.857) && (ft <= 25.604))
15         vel[1] = -0.0091;
16
17     else if ((ft > 45.604) && (ft <= 48.352))
18         vel[1] = -0.0091;
19
20     else if ((ft > 68.352) && (ft <= 71.099))
21         vel[1] = -0.0091;
22
23     else if ((ft > 91.099) && (ft <= 93.846))
24         vel[1] = -0.0091;
25
26     else
27         vel[1] = 0.0;
28
29 }
```