



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS, NATURAIS, SOCIAIS E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA DE PESCA

ELIZABETHY RIBEIRO ALMEIDA

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM FILTRO DE LEITO FLUIDIZADO
PARA SISTEMAS DE RECIRCULAÇÃO DE ÁGUA**

Pinheiro - MA

2021

Centro de Ciências, Humanas, Naturais, Saúde e Tecnologia – CCHNST
Estrada de Pacas, KM 10, Bairro Enseada - Pinheiro - MA - CEP: 65200-000
Fones: (98) 3272-9743
E-mail: eng.pesca@ufma.br

ELIZABETHY RIBEIRO ALMEIDA

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM FILTRO DE LEITO FLUIDIZADO PARA
SISTEMAS DE RECIRCULAÇÃO DE ÁGUA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Pesca do Centro de Ciências Humanas, Naturais, Saúde e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Pesca.

Orientador (a): Prof.Dra.Mikele Cândida Sousa de Sant'Anna.

Coorientador: Prof. Dr.Rodrigo Sávio Teixeira de Moura.

Pinheiro - MA

2021

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Almeida, Elizabethy Ribeiro.

Simulação computacional de um filtro de leito
fluidizado para sistemas de recirculação de água /
Elizabethy Ribeiro Almeida. - 2021.

37 p.

Coorientador(a): Rodrigo Sávio Teixeira de Moura.

Orientador(a): Mikele Cândida Sousa de SantAnna.

Curso de Engenharia da Pesca, Universidade Federal do
Maranhão, Pinheiro, 2021.

1. Aquicultura. 2. Biofiltro. 3. Fluidodinâmica
Computacional. I. Moura, Rodrigo Sávio Teixeira de. II.
SantAnna, Mikele Cândida Sousa de. III. Título.

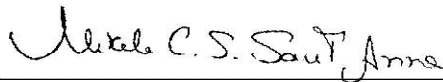
ELIZABETHY RIBEIRO ALMEIDA

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM FILTRO DE LEITO FLUIDIZADO
PARA SISTEMAS DE RECIRCULAÇÃO DE ÁGUA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Pesca do Centro de Ciências Humanas, Naturais, Saúde e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Pesca.

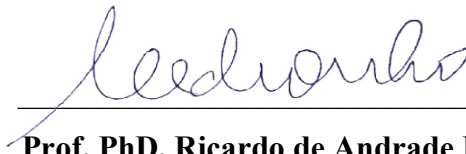
Aprovado em 26 / 04 / 2021

BANCA EXAMINADORA




Prof. Dra. Mikele Cândida Sousa de Sant'Anna (Orientadora)

Doutora em Engenharia Química
Universidade Federal do Maranhão



Prof. PhD. Ricardo de Andrade Medronho

Doutor em Chemical Engineering
Universidade Federal do Rio de Janeiro



Prof.^a Msc. Adilson Matheus Borges Machado

Mestre em Oceanografia
Universidade Federal do Maranhão

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida e por permitir que eu tivesse saúde e força, me fazendo superar os obstáculos encontrados ao longo do curso.

À minha família, em especial a minha mãe Lucibete e minha vó Almerinda que em momento algum deixaram de me apoiar em todos esses anos de estudo, que me serviram de alicerce para a construção do que eu sou hoje moldando meu caráter e me ensinando a importância do amor e da fé. Ao meu pai Reginaldo, por me mostrar o valor da simplicidade. Aos meus irmãos, Elis Regina e Reginaldo Filho por todo carinho e amor fraterno. Amo vocês!

À professora Mikele por ter sido minha orientadora, ter se empenhado e ter feito eu acreditar que daria certo, por todos os ensinamentos e “puxões de orelha”. Ao professor Rodrigo que se dispôs a me coorientar, sendo peça fundamental para a conclusão deste trabalho.

À Sandy, pelo companheirismo e amizade durante todos esses anos de PIBIC e CFD, “valeu minha patroa”.

Às meninas do “nunca...”, Edilene, Thayara, Márcia, Árgira, Ingrith, Kerly, Cleudiane e Vanessa, vocês foram mais do que colegas de turma, obrigada por tudo, a amizade de vocês contribuiu pra que eu chegasse até aqui.

Aos meus colegas da turma 2015.2, em especial à Hael pela camaradagem, vou levar vocês pra sempre na memória e no coração.

Aos professores do curso de Engenharia de Pesca, por todo conhecimento repassado. Em especial a Danilo pelos conselhos e momentos de descontração.

Ao Laboratório de Fluidodinâmica Computacional da UFRJ na pessoa do professor Ricardo Medronho por toda a assistência.

À galera da Ambio, pela convivência com todos vocês, sentirei saudade dos processamentos, coletas e lanches.

Às meninas da república, Leudiane, Isa, Lurdilene e Aline por terem sido minha família durante esses anos de “cidadã pinheirense”.

À todas as amigas que eu conquistei durante minha passagem por Pinheiro.

À todas as pessoas que contribuíram diretamente ou indiretamente pra que esse momento se concretizasse.

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM FILTRO DE LEITO FLUIDIZADO PARA AQUICULTURA

Elizabethy RibeiroAlmeida

RESUMO

A aquicultura apresentou aumento significativo nos últimos anos, registrando no período de 1990 a 2018 um aumento na produção mundial de 527%, atingindo recorde histórico de 114,5 milhões de toneladas de peso vivo em 2018. Para um bom desenvolvimento dos organismos aquáticos e uma produção economicamente viável, é necessário controle da água dos viveiros onde são cultivados, pensando nisso, intensificou-se a busca por práticas alternativas para o cultivo de peixes e de tecnologias que levem à redução do consumo de água, pois as práticas de cultivo convencionais consomem grande quantidade de água de boa qualidade. Sistema de recirculação é uma forma de cultivo na qual a água, após passar pelos tanques de produção, seguem para o tratamento em filtros mecânicos e biológicos e retornam ao sistema. Dentre os filtros mais utilizados para remoção biológica da amônia e as formas de nitrogênio gerado na produção de peixes temos: biofiltros submersos, filtros percoladores, contadores biológicos rotativos e biofiltros (reatores) de leito fluidizado. Assim sendo, o objetivo do presente trabalho foi realizar simulações computacionais para avaliar a operação de um biofiltro de leito fluidizado, utilizando técnicas de fluidodinâmica computacional para prever o fluxo hidrodinâmico em condições estabelecidas. Então, para encontrar um regime de fluidização adequado ao fenômeno estudado, duas geometrias (A e B) foram usadas, as condições da primeira foram definidas através de um planejamento fatorial 2^3 , com diâmetro da areia, velocidade da água e altura do leito distintos e a segunda somente com valores de velocidades diferentes. A geometria A contava com uma entrada e a geometria B com um distribuidor de sete orifícios. Embora conseguidas altas expansões (geometria A, 110% e geometria B, 60%) em nenhuma simulação houve a saída da areia pra fora do equipamento. A fluidização suave foi alcançada pelas simulações da geometria B.

Palavras-chave: Aquicultura, Biofiltro, Fluidodinâmica Computacional.

SUMÁRIO

1INTRODUÇÃO	8
2METODOLOGIA.....	9
2.1 Software e Hardware	10
2.2Geometrias	10
2.3Teste de malha	11
2.4Planejamento fatorial	12
3RESULTADOS	14
3.1Escolha da malha	14
3.2Simulações	18
3.2.1 Geometria A	18
3.2.2 Geometria B	20
4DISCUSSÃO 22	
5CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	24
REFERÊNCIAS	25
APÊNDICE A – SIMULAÇÕES DA GEOMETRIA A	28
APÊNDICE B – SIMULAÇÕES DA GEOMETRIA B.....	35

1 INTRODUÇÃO

A produção aquícola no mundo alcançou o recorde, de 114,5 milhões de toneladas em peso vivo em 2018, a aquicultura em águas interiores produziu 51,3 milhões de toneladas de animais aquáticos, correspondendo a 62,5% da produção mundial de peixes para fonte alimentícia. A projeção para 2030 é de 109 milhões de toneladas, um aumento de 32%(FAO, 2020). Segundo a Associação Brasileira da Piscicultura (2021) o Brasil atingiu 802.930 toneladas em 2020, com receita de cerca de R\$ 8 bilhões. O Brasil é o quarto maior produtor mundial de tilápia, espécie que representa 60% da produção do país. Nos últimos seis anos, a produção de peixes de cultivo saltou 38,7% no país: de 578.800 t (2014) a 802.930 t (2020).

A aquicultura em águas interiores produz a maior parte dos animais aquáticos cultivados, principalmente de água doce. O que promove rápidos e significativos avanços na melhoria dos sistemas integrados, mas para alcançar o desenvolvimento esperado, o setor precisa superar muitos desafios, como o uso da água na aquicultura, que é uma preocupação mundial porque os métodos de cultivo tradicionais consomem muita água de alta qualidade. Esse fato incentivou a realização de estudos para desenvolver tecnologias que reduzam o consumo de água, por exemplo, os sistemas de cultivo com uso de recirculação de água, onde é possível produzir organismos aquáticos com liberação mínima de efluentes e utilizando-se apenas a reposição da quantidade de água que se perde por evaporação, que corresponde a aproximadamente 5% do volume total por dia (CREPALDI *et al.*, 2006).

Sistema de recirculação de água (RAS) é um sistema de produção em que um determinado volume de água de cultivo é reaproveitado por meio de tratamento contínuo. Pode mitigar a maioria dos impactos ambientais potenciais e, simultaneamente, minimizar as demandas de água (TANVEER *et al.*, 2020). Os sistemas de recirculação são compostos por diversos equipamentos como: tanques de cultivo, decantadores e filtros mecânicos, biofiltro, sistema de aeração/oxigenação, sistema de bombas e tubulações de drenagem e retorno e unidade de quarentena (KUBITZA, 2006), sendo necessário estudos para dimensionar e otimizar as unidades. O filtro biológico é fundamental para o tratamento da água de cultivo. Esses equipamentos são responsáveis por reduzir as concentrações de amônia. A amônia existe em solução aquosa em duas formas: NH_3 e NH_4^+ , embora ambas as formas possam ser tóxicas para os peixes, a forma nãoionizada (NH_3) é a forma mais tóxica em baixas concentrações, então é necessário passar pelo processo de nitrificação, onde primeiro a amônia é oxidada em nitrito (NO_2^-) por vários gêneros de bactérias autotróficas, como o *Nitrosomonas* e depois o nitrito é oxidado ao nitrato muito menos tóxico (NO_3^-) por vários outros gêneros de bactérias, principalmente o *Nitrobacter* (HAGOPIAN & RILEY, 1998; CHEN *et al.*, 2006).

Bactérias nitrificantes autotróficas geralmente coexistem com microrganismos heterotróficos, que metabolizam compostos orgânicos degradáveis e a demanda bioquímica de oxigênio carbonáceo de cinco dias (cBOD5). Quando a carga de matéria orgânica que flui para o biofiltro é alta, as bactérias heterotróficas podem competir com as bactérias nitrificantes por espaço e oxigênio, o que pode reduzir a remoção de nitrogênio amoniacal total (TAN) e/ou levar a um aumento líquido de nitrito. Portanto, os sólidos são normalmente filtrados da água

do processo antes de serem introduzidos no biofiltro (SUMMERFELT *et al.*, 2001; ZHU e CHEN, 2001; LING e CHEN, 2005).

Dentre os filtros mais utilizados para remoção biológica da amônia e as formas de nitrogênio gerado na produção de peixes temos: biofiltros submersos, filtros percoladores, contadores biológicos rotativos e biofiltros (reatores) de leito fluidizado (TIMMONS *et al.*, 2002; LAWSON, 2013). Os leitos fluidizados estimulam o crescimento do biofilme em pequenas partículas transportadoras que permanecem suspensas no fluido em tratamento; ou seja, os leitos são expandidos por forças associadas ao fluxo ascendente de água (SANDU *et al.*, 2002). Um dos mais utilizados e vantajosos são os biofiltros de areia fluidizada (*Fluidized Sand Biofilters* - FSBs), por ter alta eficiência de tratamento de água (remoção de TAN de 50-90%), tamanho pequeno, baixo custo e sem necessidade de retrolavagem. O custo da área de superfície em FSBs é considerado baixo (ou seja, US\$ 0,05–0,004 por m² de área de superfície) porque a areia do filtro tem uma elevada área de superfície específica (entre 4000–20.000 m²/m³) e é de baixo custo, com valor aproximado de US\$ 70–200 por m³ de areia entregue (SUMMERFELT *et al.*, 2004; LIU *et al.*, 2015).

Biofiltros convencionais de areia fluidizada (FSBs) têm sido amplamente adotados na América do Norte, especialmente em sistemas de recirculação que devem manter a qualidade da água excelente para produzir espécies como o juvenil de salmão, truta do ártico, truta arco-íris, peixes ameaçados de extinção e peixes tropicais ou ornamentais (HEINEN *et al.*, 1996; SUMMERFELT e WADE, 1998; FORSYTHE e HOSLER, 2002; HOLDER, 2002; WILTON, 2002; SUMMERFELT *et al.*, 2004; MONTAGNE, 2004; WEAVER, 2006).

FSBs podem tratar variados fluxos de água, podem ter formato circular ou retangular, podem estar contidos em tanques de plástico, fibra de vidro, concreto ou aço revestido com esmalte, podem ser relativamente fáceis de gerenciar porque não filtram sólidos do fluxo de passagem e a biomassa microbiana em crescimento ativo no leito expandido pode ser facilmente colhida por sifonamento das partículas mais leves (SUMMERFELT, 1996; SUMMERFELT *et al.*, 2004, SUMMERFELT, 2006). Os biofiltros de areia fluidizada foram estudados por SUMMERFELT (1996, 1998, 2001, 2004 e 2006), SANDU *et al.* (2002), DAVIDSON *et al.* (2005), WEAVER (2006), LIU *et al.*, (2014 e 2015) e TSUKUDA (2015).

A modelagem do biofiltro de areia fluidizada é complexa por conta do comportamento do fluxo de água e das interações entre as fases líquida e particulada. As ferramentas da fluidodinâmica computacional (CFD), destacam-se por prever o movimento dos fluidos em leitos fluidizados, orientando a determinação do design, o aumento de escala e otimização dos equipamentos (CORNELISSEN *et al.*, 2007). A simulação computacional possibilita realizar avaliações dos parâmetros do modelo de forma mais rápida, o estado do sistema pode ser conhecido em qualquer instante e até pode-se observar processos que não são possíveis de serem visualizados no experimento real (RAMIREZ *et al.*, 2009). Assim sendo, o objetivo do presente trabalho foi realizar simulações computacionais para avaliar a operação de um biofiltro de leito fluidizado, utilizando técnicas de fluidodinâmica computacional para prever o fluxo hidrodinâmico em condições estabelecidas.

2 METODOLOGIA

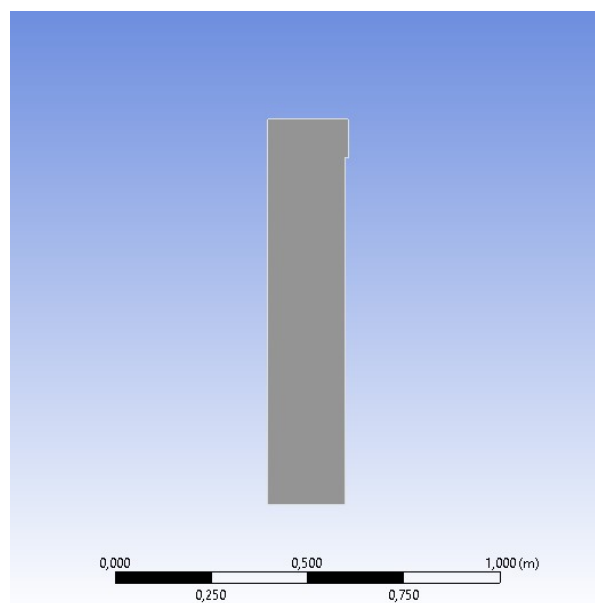
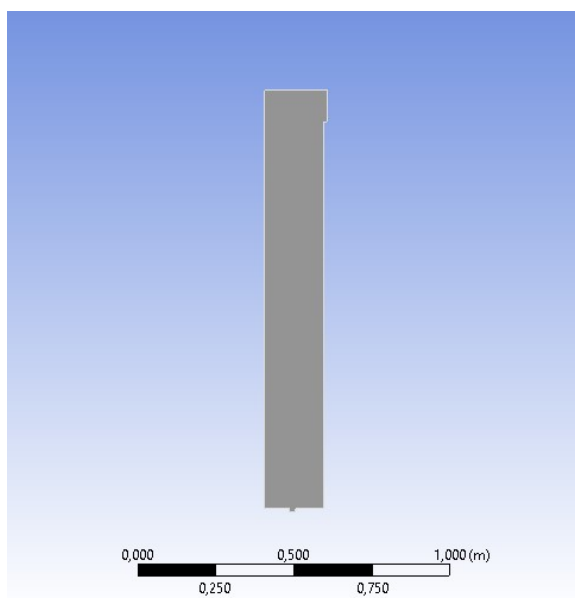
2.1 Software e Hardware

As simulações foram realizadas em um computador com configuração de processador ® Intel core i7 de 3.30 GHz e de 32 GB de memória RAM. O software utilizado foi o ANSYS (licença acadêmica). Para a elaboração da geometria, malha e visualização dos resultados, empregou-se o Design Modeler, o Meshing e o CFD-Post, respectivamente. O FLUENT foi usado no *setup* e na resolução das equações de conservação. As simulações mais complexas foram realizadas (com a licença acadêmica de pesquisa) através de uma parceria com o Lab CFD - Laboratório de Fluidodinâmica Computacional do Departamento de Engenharia Química da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

2.2 Geometrias

A geometria A (Figura 1) foi inspirada nos estudos de Liu (2015), desenhada em 2D, simplificação já realizada por Sant'Anna *et al.* (2015, 2016 e 2017), para reduzir o esforço computacional. A Geometria B (Figura 2) foi construída com base na análise dos resultados obtidos para a Geometria A, e difere da mesma pela inserção de um distribuidor com sete entradas, objetivando a melhor distribuição da fase líquida na entrada do biofiltro.

Os valores das dimensões como: altura, inlet e outlet da Geometria A e B são



exibidos na Tabela 1.

Figura 1 - Geometria A

Figura 2 - Geometria B

Tabela 1. Dimensões das geometrias

Dimensões	Geometria A (m)	Geometria B (m)
Altura do cilindro	1,34	1,00

Inlet	0,02	7 x0,013
Outlet	0,10	0,10

2.3 Teste de malha

A malha é a principal responsável pela qualidade da solução, portanto, deve-se atentar à sua construção, a fim de minimizar sua influência no resultado, sendo, tão somente, um instrumento para atingir o mesmo (SANT'ANNA, 2015). Para avaliar a influência da malha na geometria A, foi variado o parâmetro *Max face size* foram então realizadas simulações para avaliar os resultados decorrentes dessas alterações (Tabela 2), o teste de malha foi importante para reduzir o esforço computacional.

Tabela 2. Estatística das três diferentes malhas da Geometria A.

Malhas Parâmetros	Malha1	Malha2	Malha 3
<i>Max face size</i>	0,005	0,003	0,002
Número de nós	21.076	58.482	130.750
Número de elementos hexaédricos	10.228	28.724	64.600

Na malha da Geometria B (Tabela 3) foi realizado um maior refinamento nas paredes e entrada do biofiltro com a finalidade de melhor descrever os fenômenos na entrada do equipamento.

Tabela 3. Estatística da malha refinada da Geometria B

Parâmetros	Malha
Número de nós	7.755
Número de células	7.508
Faces	15.262

As propriedades da fase líquida (água) estão disponíveis no banco de dados do FLUENT, já as propriedades da areia foram obtidas através dos estudos de Sant'Anna et al. (2017) e Summerfelt (2004), dados esses que foram utilizados nas duas geometrias e que são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Propriedades das fases.

Fases	Densidade (kg/m ³)	Viscosidade (kg/(ms))	Diâmetro (µm)
Água	9,98x10 ² (ANSYS FLUENT, 2014)	1,003x10 ⁻³ (ANSYS FLUENT, 2014)	-
Areia	2,6x10 ³ (LIU <i>et al.</i> , 2015)	-	275 (Summerfelt, 2004)

Utilizou-se a abordagem Euleriana-Euleriana que interpreta as fases matematicamente como contínuas e as equações de Navier-Stokes foram aplicadas às fases, sendo o acoplamento entre elas realizado pela pressão e pelo coeficiente de troca de interface. O sistema de equações obtido foi resolvido através de modelagem mecanicista utilizando-se o método PhaseCoupled SIMPLE para solução do acoplamento pressão-velocidade.

Na Geometria A, foi utilizada a discretização espacial de segunda ordem para todas as equações, com exceção da fração volumétrica, sendo esta discretizada pelo método QUICK. Para discretização temporal utilizou-se a discretização de segunda ordem implícita. O modelo de turbulência escolhido foi o k-ε (Sant'Anna *et al.*, 2015; 2016; 2017). O modelo de arrasto utilizado foi o Gidaspow e a correlação Syamlal-O'Brien foi selecionada para definir a viscosidade cinética granular (Liu *et al.*, 2015). O coeficiente de restituição partícula – partícula foi estabelecido como sendo igual a 0,9. O regime de simulação foi transiente, com o passo de tempo de 5,0x10⁻⁵ segundos, onde o tempo total de simulação foi de 5 s, sendo necessárias 100.000 iterações.

Em relação a Geometria B, na discretização espacial utilizou-se segunda ordem implícita para momento, PRESTO para pressão, já a fração volumétrica foi discretizada pelo método QUICK e demais discretizadas pela primeira ordem implícita. O modelo de turbulência utilizado neste trabalho foi o k-ε (padrão). Gidaspow foi usado como modelo de coeficiente de arrasto e Syamlal-O'Brien como correlação de viscosidade granular (Liu *et al.*, 2015). O coeficiente de restituição partícula–partícula foi estabelecido como sendo igual a 0,9. O regime de simulação foi transiente, o passo de tempo escolhido foi 1,0x10⁻³ segundos, o tempo total de simulação foi de 10 s, sendo necessárias 10.000 iterações.

2.4 Planejamento fatorial

Para analisar a influência da modificação das características da fluidização no filtro e encontrar uma condição de fluidização suave, minimizando os efeitos da agregação da fase particulada, foi realizado um planejamento fatorial 2³, com oito ensaios, mais seis pontos axiais (PA) e três pontos centrais (PC), totalizando dezessete simulações. Mas só foram realizadas 14 simulações.

As variáveis estudadas foram o diâmetro da partícula de areia (d_A), a altura do leito em repouso (A_L) e a velocidade superficial de entrada da água (v_a). O intervalo das variáveis foi escolhido baseado nos estudos apresentados na literatura (SUMMERFELT 1996, 1998, 2001, 2004 e 2006; SANDU *et al.* 2002; DAVIDSON *et al.* 2005; WEAVER 2006; LIU *et al.*, 2014 e 2015 e TSUKUDA, 2015), referente as características da areia utilizada nos sistemas de fluidização. Os níveis para as propriedades estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Níveis das variáveis usados no planejamento fatorial 2^3 .

Níveis		Variáveis	
	d_A (X1) μm	A_L (X2) m	V_a (X3) m.s^{-1}
-1,68	122	0,07	0,0184
-1	180	0,10	0,0271
0	227,5	0,15	0,1355
+1	275	0,20	0,2168
+1,68	321	0,23	0,2532

As condições de operação usadas nos experimentos computacionais foram as mesmas utilizadas no teste de malha. A realização de um planejamento fatorial foi necessária para a obtenção de uma condição de melhor distribuição da fase particulada através da fase líquida, para assim promover um maior contato entre as fases e conseqüentemente aumentar a região de contato, para a fixação das bactérias e promoção das reações de nitrificação.

Tabela 6: Tabela decodificada.

Ensaio	X1 (μm)	X2 (m)	X3 (m.s^{-1})
1	180	0,10	0,0271
2	275	0,10	0,0271
3	180	0,20	0,0271
4	180	0,10	0,2168
5	275	0,20	0,0271
6	275	0,10	0,2168
7	180	0,20	0,2168
8	275	0,20	0,2168
9	122	0,15	0,1355
10	321	0,15	0,1355

11	227,5	0,07	0,1355
12	227,5	0,23	0,1355
13	227,5	0,15	0,0184
14	227,5	0,15	0,2532

Depois de realizadas as simulações, foi escolhido as condições do ensaio 8, para a simulação da Geometria B. Necessitou-se então, testar valores de velocidades distintas com o intuito de assim encontrar a fluidizaçãosuave entre as fases líquida e sólida, portanto, os valores das velocidades foram os descritos na Tabela 7.

Tabela 7. Velocidades superficiais da água

Velocidade superficial da fase líquida (m.s ⁻¹)	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
---	------	------	------	------	------

3 RESULTADOS

3.1 Escolha da malha

A malha é parte vital em uma simulação numérica, tanto pela precisão dos dados obtidos numericamente, como pelo tempo computacional requerido (MARINI, 2008). Com a finalidade de ver a influência da malha sobre os resultados foram escolhidas as variáveis fração volumétrica e queda de pressão.

No tratamento biológico de efluentes, a fração volumétrica (holdup) de sólidos, no caso da areia, refere-se à quantidade de partículas sólidas usadas como suporte e a massa de biofilme presente no interior do biofiltro. Em velocidades superficiais mais altas, especialmente quando as forças de arrasto excedem as forças da gravidade para baixo nos grãos de areia, as partículas se movem no leito ocorrendo a fluidização. Enquanto que a queda de pressão determina a quantidade de energia envolvida na promoção do contato da areia com a água, por meio do qual ocorre a transferência de massa requerida no processo (RIEDEL, 1995).

Em relação a geometria A, com o intuito de analisar influência da malha nos resultados, foram construídos gráficos para avaliar a altura que o leito alcançava ao ser fluidizado, foram estudados a fração volumétrica de areia em função da altura do leito (Figura 3) e também a queda de pressão em função da altura do leito (Figura 4).

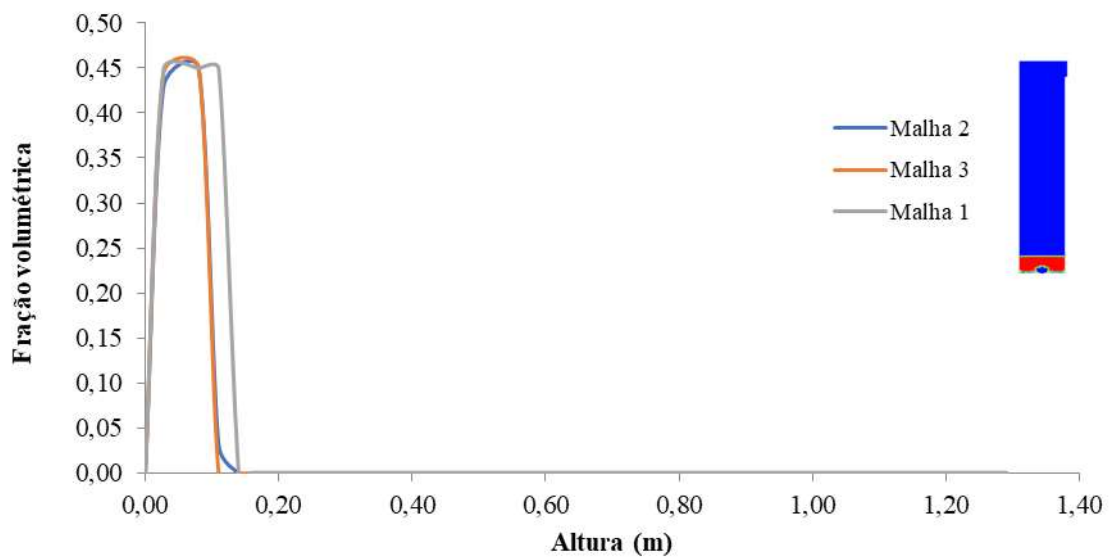


Figura 3 – Fração volumétrica em função da altura do leito ($v = 0,0271 \text{ m.s}^{-1}$, $t = 2,50 \text{ s}$).

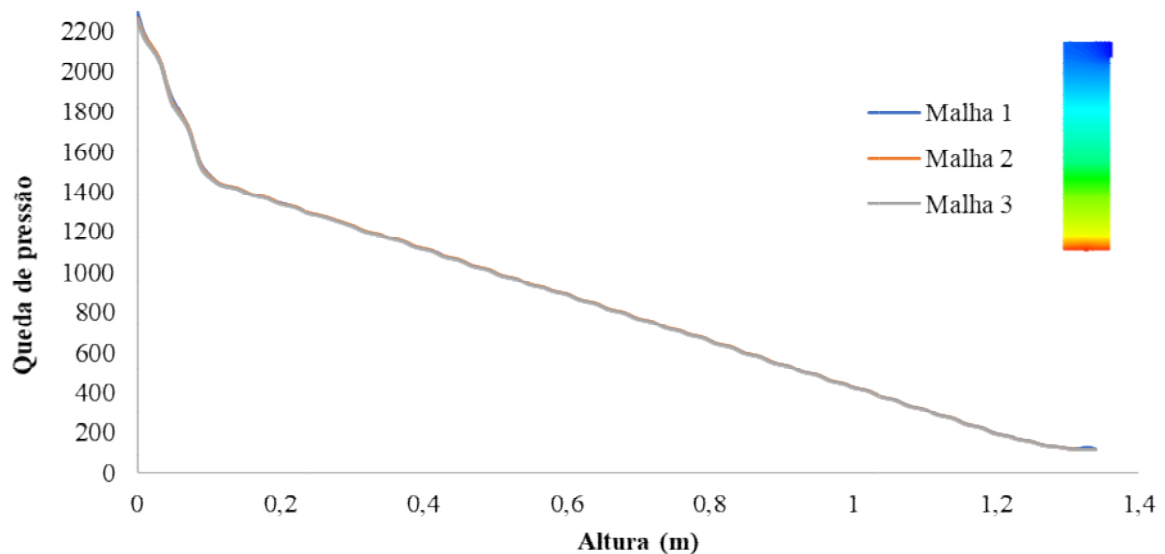


Figura 4 - Queda de pressão em função da altura do leito ($v_g = 0,0271 \text{ m.s}^{-1}$, $t = 2,50 \text{ s}$).

Pode-se observar diferentes malhas testadas, nas Figuras 3 e 4, as curvas das malhas 2 e 3 ficaram bem próximas, quase coincidentes para a fração volumétrica e superpostas para a queda de pressão. Decidiu-se então, pela Malha 2, devido a esta apresentar um menor número de elementos e por consequência reduzir o esforço computacional.

A água promove o arraste da fase particulada ao longo do tempo, o leito tem altura inicial de 0,10 m, uma pequena expansão é promovida, e a areia não é distribuída uniformemente em toda a fase líquida, gerando regiões de fluidização agregativa e com maiores concentrações de areia. Flutuações nos valores da pressão são observadas a partir do

tempo de 2,50 s. A Figura 5 ilustra os perfis obtidos nas malhas para fração volumétrica e para queda de pressão, para as diferentes malhas e tempos de simulação, respectivamente.

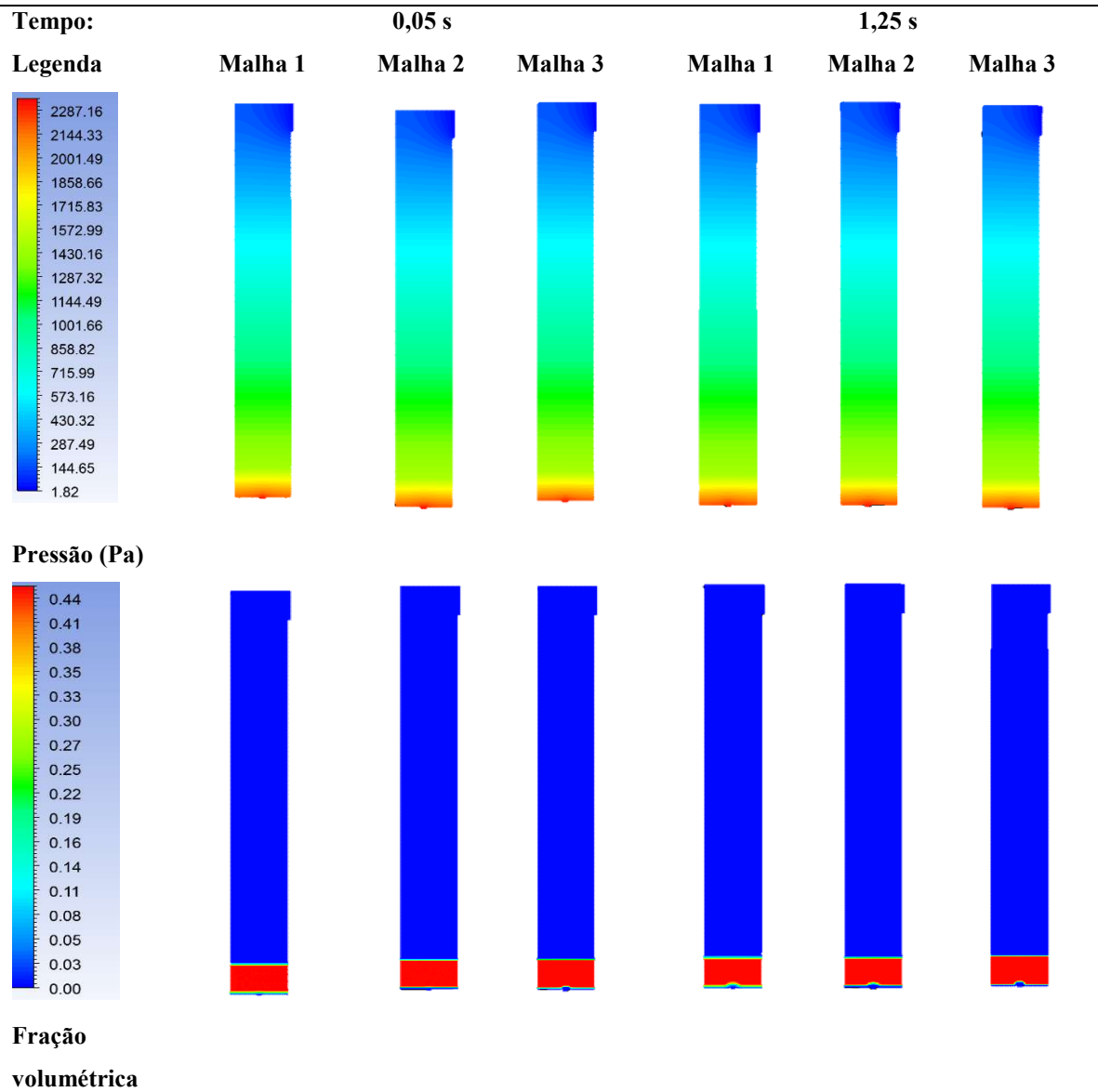


Figura 5 – Perfis longitudinais de queda de pressão e fração volumétrica) 0,05 e b) 1,25 s.

Tempo:	2,50 s			5,00 s		
Legenda	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 1	Malha 2	Malha 3

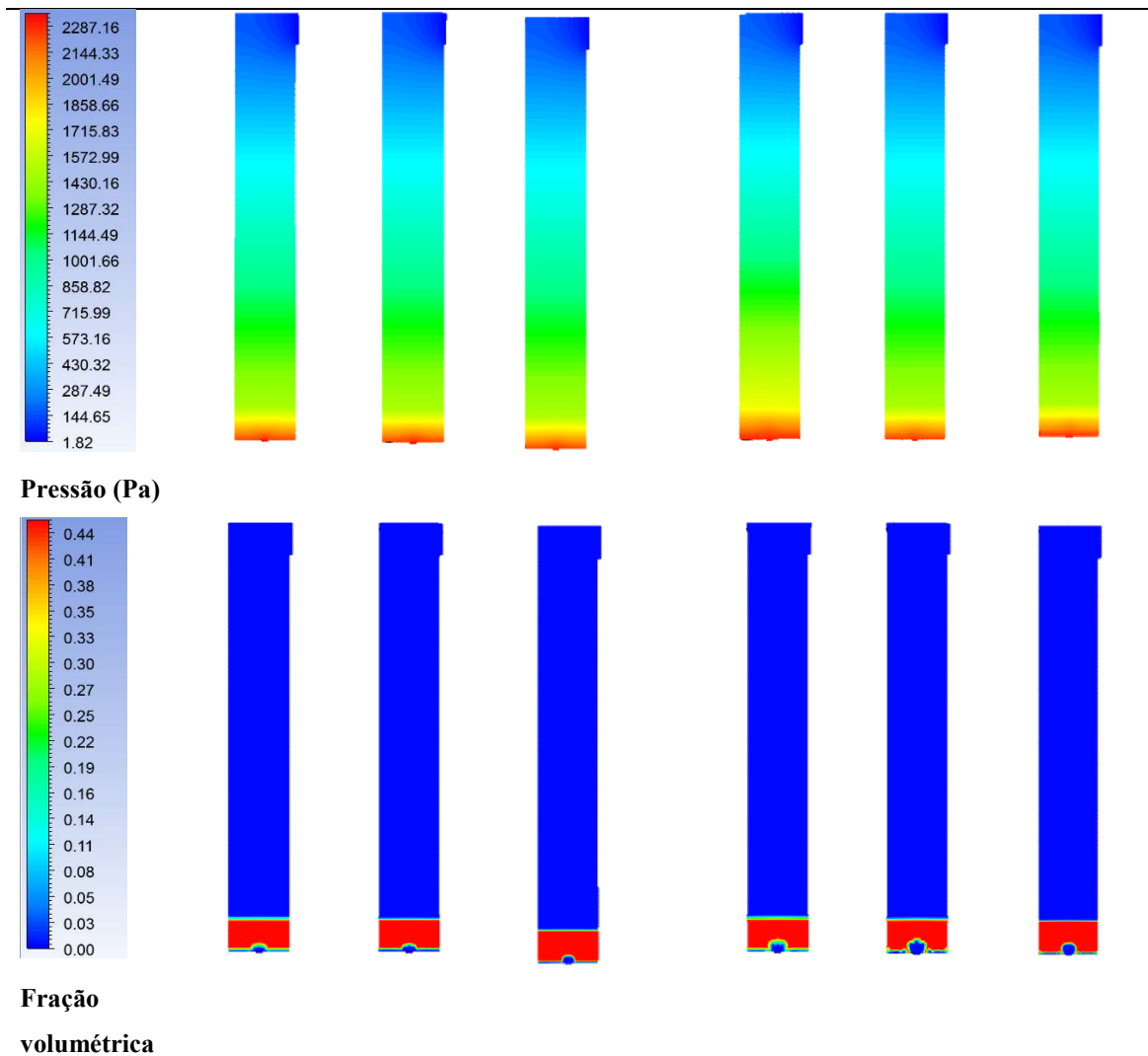


Figura 5 – Perfis longitudinais de queda de pressão e fração volumétrica: c) 2,50 s e d) 5,00 s.

Para a Geometria B foi realizado refinamento nas paredes que podem ser visualizados na Figura 6.

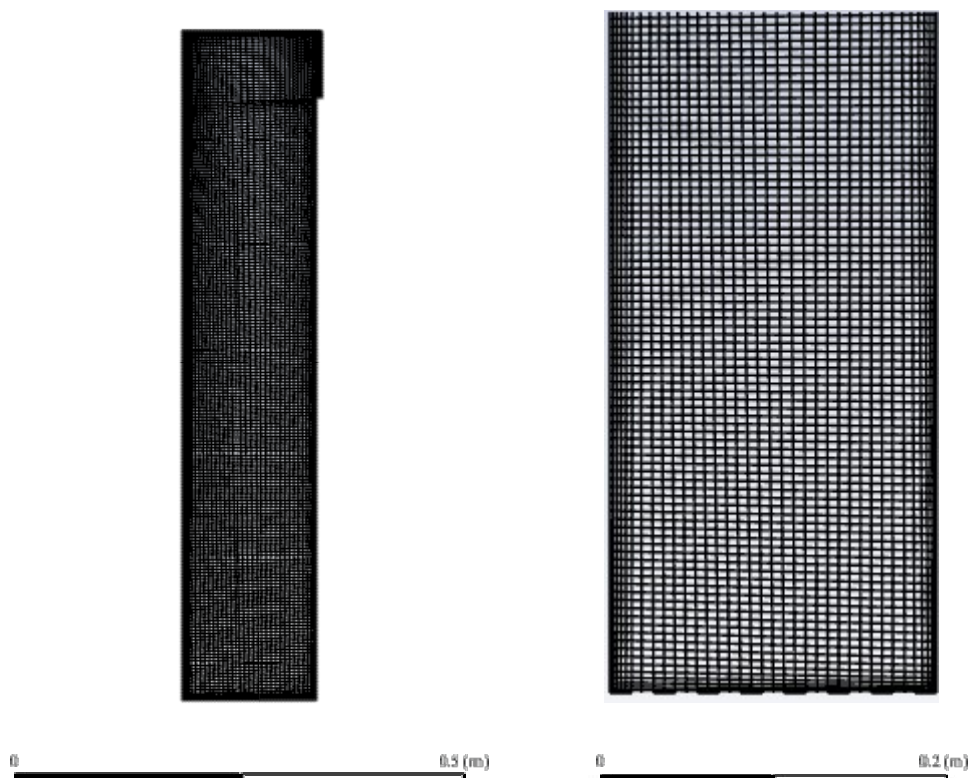


Figura 6 – Malha refinada utilizada nas simulações da geometria B.

3.2 Simulações

3.2.1 Geometria A

Para uma melhor visualização dos resultados foram escolhidos os parâmetros de fração volumétrica da areia e queda de pressão ao longo do leito (Sant’Anna *et al.*, 2015, 2016 e 2017). O Planejamento Fatorial realizado para a geometria A pode ser analisado a partir das avaliações das curvas, a Figura 7 apresenta a fração volumétrica em relação à altura do cilindro para os 14 ensaios analisados.

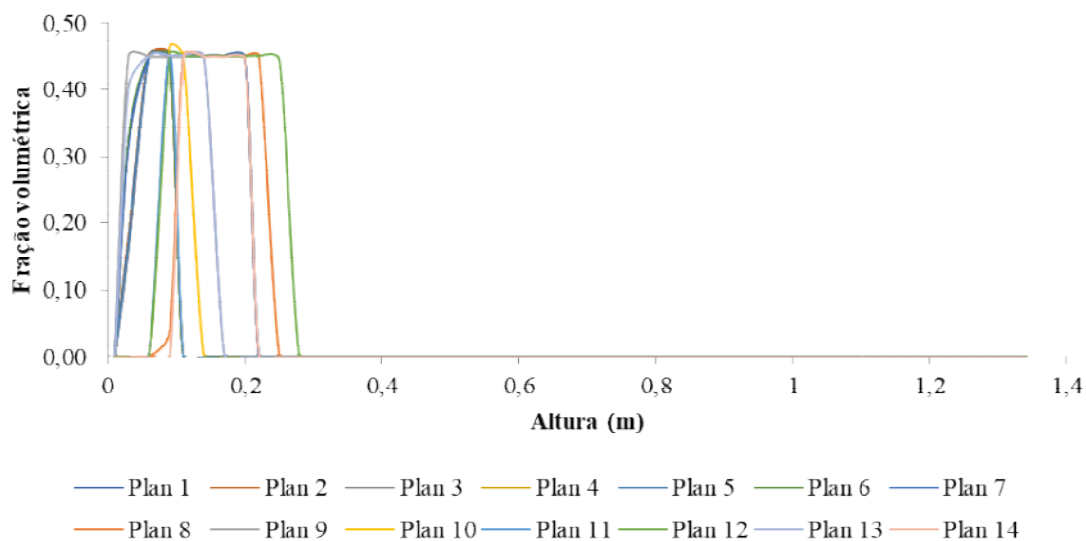


Figura 7 – Fração volumétrica em função da altura final do leito para os 14 ensaios (t = 5s)

A fluidização ocorreu em todos os ensaios com alturas atingidas diferentes para cada experimento computacional do planejamento e o ensaio 12 obteve a maior altura final do leito, 0,27 m. A Figura 8 ilustra a pressão em função da altura do biofiltro.

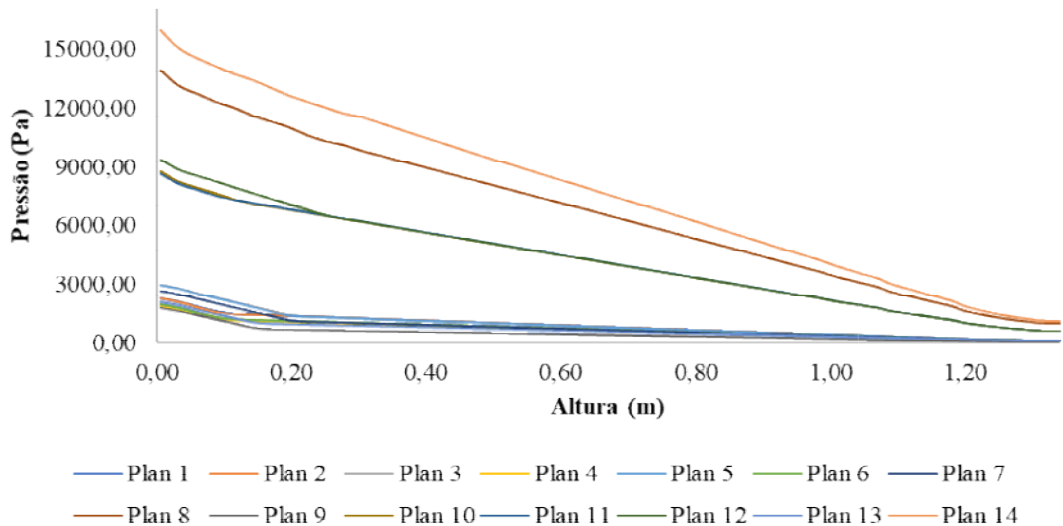


Figura 8 – Queda de pressão em função da altura final do leito para os 14 ensaios(t = 5s)

As curvas apresentaram comportamento semelhante entre cada ensaio, diferenciando somente no valor da pressão ao atingir determinada altura (quando ocorre a fluidização) o ensaio 14 atingiu a maior queda de pressão. Os ensaios de número 1, 2, 4, 6 e 11 obtiveram menor altura final do leito. O ensaio 8 apresentou a altura final de 0,22 m, equivalendo a uma expansão de 110%. Para melhor visualização os perfis longitudinais de fração volumétrica e queda de pressão podem ser vistos no APÊNDICE A.

O tempo de residência das simulações da Geometria A podem ser observados na Tabela 8.

Tabela 8 - Tempo de residência da geometria A

Planejamento	Tempo (s)
1, 2, 3 e 5	48
4, 6, 7 e 8	6
9, 10, 11 e 12	9
13	85
14	5

Através da análise do planejamento fatorial foi verificado que a variável que apresentou influência significativa foi a velocidade da água, sendo escolhida como variável a ser melhor avaliada nos ensaios posteriores das simulações, foram utilizadas as mesmas condições do planejamento 8 (diâmetro da areia possui o valor de $2,75 \times 10^{-6}$, a altura do leito com 0,20 cm). Expansões semelhantes foram obtidos nos resultados experimentais de Summerfelt (2006) e com as simulações realizadas por Liu et al. (2014) atingindo valores de 20 –150% e 40 –120%, respectivamente.

3.2.2 Geometria B

O biofiltro foi simulado, em uma geometria adaptada com o distribuidor da fase líquida, e através desta simulação observou-se melhorias no padrão de fluidização e consequentemente na mistura dos materiais no leito. Avaliou-se também o que ocorria com as elevações de velocidade ($0,01 \text{ m.s}^{-1}$ até $0,05 \text{ m.s}^{-1}$). A Figura 9 apresenta as curvas de fração volumétrica da fase particulada pela altura do biofiltro.

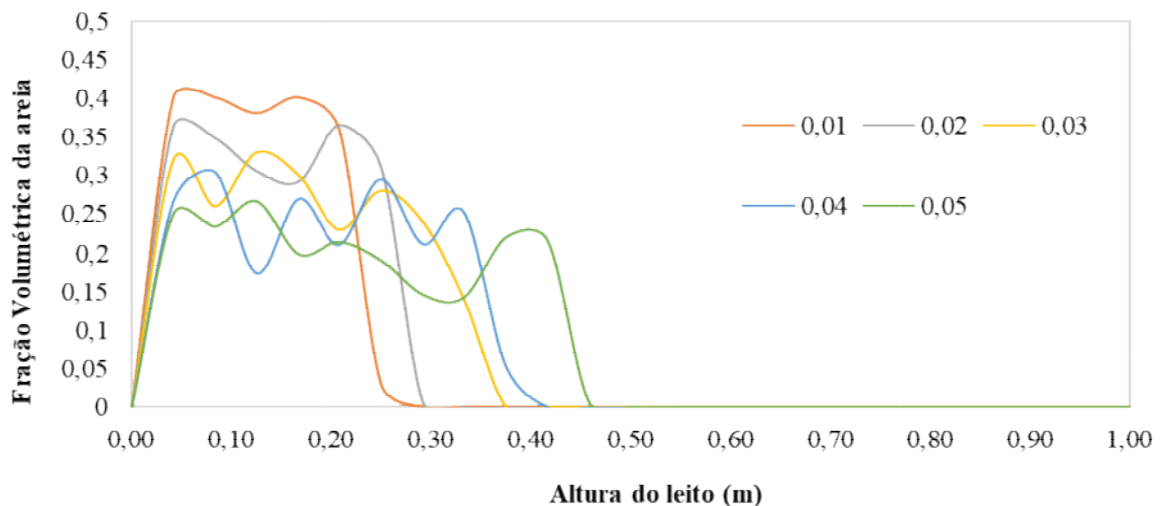


Figura 9 - Fração volumétrica em função da altura final do leito para as 5 velocidades ($t = 10\text{s}$)

Nas simulações da geometria B, é possível observar que à medida que se aumentou a velocidade de entrada da fase líquida, aumentou a expansão do leito. Para a velocidade de $0,01 \text{ m.s}^{-1}$ a altura final do leito foi de 0,3 m e para a velocidade $0,05 \text{ m.s}^{-1}$ a altura final do leito foi de 0,5 m. Importante salientar que de acordo com os valores gerados nas simulações não ocorreu perda de material particulado pela saída do equipamento, isto é, não houve arraste de areia. A Figura 10 apresenta as curvas de queda de pressão pela altura do biofiltro.

A maior queda de pressão foi obtida na velocidade de valor $0,05 \text{ m.s}^{-1}$, alcançando 1476 Pa, enquanto que a velocidade $0,01 \text{ m.s}^{-1}$ alcançou menor valor, equivalente a 1452 Pa. Frisa-se que ao aumentar a velocidade, maior será a queda de pressão, consequentemente

maior será a altura final do leito. A velocidade 0,01 obteve 60% de expansão sendo esse um resultado aceitável significando que não haverá saída de areia do sistema e a danificação dos equipamentos de bombeamento do sistema. Os perfis de fração volumétrica e pressão podem

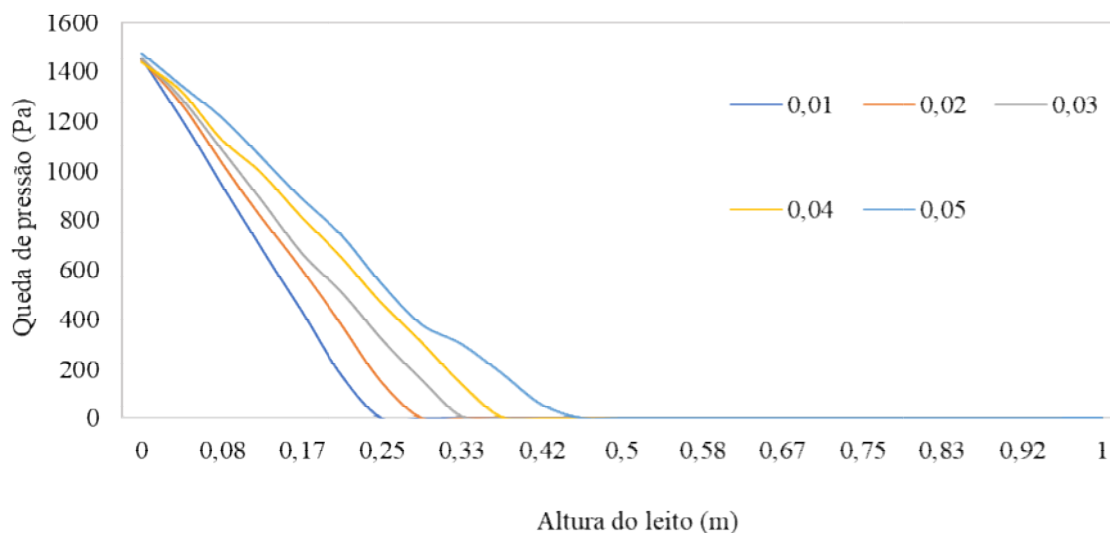


Figura 10 - Pressão em função da altura final do leito para as 5 velocidades (t = 10s) ser visualizados no APENDICE B.

O tempo de residência das simulações da GeometriaB podem ser observados na Tabela 9.

Tabela 9 - Tempo de residência das simulações da geometria B .

Velocidades (m/s)	Tempo (s)
0,01	105
0,02	50
0,03	33
0,04	25
0,05	20

4 DISCUSSÃO

No trabalho realizado por Liu et al. (2014) as mudanças na fração volumétrica em três velocidades diferentes foram semelhantes, especialmente nos picos de concentração de volume, esse mesmo resultado foi visto nas simulações da geometria A e B, mostrando que principalmente na geometria B as velocidades influenciaram na distribuição da fase particulada.

Summerfelt e Cleasby (1996) concluíram que a fração da areia deve expandir pelo menos 10% a 20% no design de velocidade superficial, a fim de minimizar a ocorrência de pilhas de areia estáticas na base do leito. Através da análise do planejamento fatorial foi verificado que a variável que apresentou influência significativa foi a velocidade da água. De acordo com Liu et al. (2014) partículas mais finas requerem menor velocidade da água para atingir a mesma expansão de leito nas mesmas condições.

Expansões muito baixas não possibilitam uma boa limpeza e valores acima de 50% também são indesejáveis, por permitirem a perda de material. Na prática são consideradas expansões entre 25 e 50%, sendo 40% um valor comumente empregado (GHISI et al., 2017; RICHTER e AZEVEDO NETTO, 1991). Portanto, o valor de expansão da simulação com a geometria A equivalente a 110%, não foi o almejado pois não resultou em uma fluidização suave e bem distribuída, essas condições foram conseguidas pela simulação da geometria B, mesmo obtendo 60% de expansão, não apresentou saída de areia do equipamento. Ilustrando que é possível aumentar a expansão, e não prejudicar o funcionamento do sistema. O aumento na expansão é requerido, pois isso caracteriza uma melhor distribuição das partículas (que contém o biofilme) no líquido que está sendo tratado no sistema.

Para Yu e Rittmann (1997), é necessário ter informações confiáveis sobre a altura de fluidização porque esta estabiliza o tempo de residência e a área superficial específica do biofilme na zona biologicamente ativa. Em um estudo de Tsukuda et al. (2015) um biofiltro de areia fluidizada de 4 m removeu $26,9 \pm 0,9\%$ da carga de Nitrogênio em um tempo de retenção hidráulica de apenas 15 min, resultando em uma taxa de remoção de $402 \pm 14 \text{ g NO}_3\text{-N/m}^3$. Portanto, o tempo de retenção hidráulica das simulações da geometria A, deveria ser maior para que a duração da água no sistema fosse suficiente para haver a reação de nitrificação de forma eficiente. É interessante acrescentar que a zona de reação, é a zona que contém a fase particulada, logo, o tempo de retenção normalmente calculado para esses equipamentos, não leva em consideração a altura alcançada pelo leito após a fluidização, sendo que nesta zona ocorre praticamente toda a reação, sendo este o cálculo comumente empregado, não tão eficaz. Estudos devem ser realizados levando em consideração a cinética, logo o tempo necessário para as sínteses e a zona de reação, adaptando a equação de tempo de retenção para esses equipamentos. Experimentos foram elaborados para esta etapa do trabalho, mas devido à pandemia, não foi possível realizar os testes experimentais e com eles propor melhores ferramentas para o dimensionamento adequado destes sistemas.

Em relação às simulações da geometria B, os resultados foram melhores, o tempo de retenção hidráulica da velocidade de valor 0,01 m/s foi razoável, caracterizando-se como a simulação que teoricamente teria a maior taxa de remoção dos compostos nitrogenados. Destaca-se ainda que quanto maior a altura do biofiltro maior deverá ser o tempo de retenção hidráulica, então esse é um fator determinante para a eficiência do equipamento. Sendo importante relatar que as geometrias comparadas foram diferentes. O volume total da geometria A é de 0,34 m³ com altura igual a 1,34 m, na geometria B o volume é de 0,21 m³ e a altura de 1,0 m, já o biofiltro de Tsukuda et al. (2015) o volume era igual a 0,20 m³ e altura igual a 4,0 m.

Devido à presença de distribuidores em sua base, a geometria B, apresentou melhores perfis de fluidização suave, sendo possível melhorar os padrões de mistura entre a fase líquida e a fase particulada, garantindo a melhoria da eficiência do processo de tratamento biológico da água nos biofiltros, no entanto ainda são necessários inúmeros estudos para ajustar o tempo necessário para que as reações ocorram (depende da cinética das reações), com isso seria possível implementar uma geometria que garantisse o tempo de retenção necessário para que as reações ocorram.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A geometria B obteve melhores resultados para fluidização suave. As condições de diâmetro das partículas de areia e velocidade da água se correlacionam, portanto, quanto menor o diâmetro da areia menor terá que ser a velocidade na entrada do equipamento para que não haja a saída da areia e ocorra a fluidização, levando em consideração também a expansão do leito que não deve ser nem tão baixa e nem tão alta.

O cálculo do tempo de retenção hidráulica para esses equipamentos não é adequado, pois não leva em consideração a zona específica onde ocorre praticamente toda a reação, é fundamental um estudo mais aprofundado para saber o tempo necessário que esses micro-organismos precisam para remover os compostos nitrogenados que são tóxicos para os peixes e promover a maior taxa de tratamento biológico por volume.

Devido à pandemia da Covid-19 não foi possível realizar a validação das simulações em leito de areia fluidizada em escala real, sendo esse o próximo passo para estudos futuros. No entanto a comparação realizada para os trabalhos descritos na literatura, ilustram que as simulações apresentam resultados satisfatórios e condizentes com os fenômenos que ocorrem nos experimentos reais.

REFERÊNCIAS

CHEN, Shulin; LING, Jian; BLANCHETON, Jean-Paul. Nitrification kinetics of biofilm as affected by water quality factors. **Aquacultural Engineering**, v. 34, n. 3, p. 179-197, 2006.

CORNELISSEN, J.T.; TAGHIPOUR, F.; ESCUDIÉA, R.; ELLIS, N.; GRACE, J.R. CFD modelling of a liquid–solid fluidized bed. **Chemical Engineering Science**, vol. 62, p. 6334–6348, 2007.

CREPALDI, D.V.; TEIXEIRA, E.A.; FARIA, P.M.C.; RIBEIRO, L.P.; MELO, D.C.; CARVALHO, D.; SOUSA, A.B.; SATURNINO, H.M. Sistemas de produção na piscicultura. **Revista Brasileira de Reprodução Animal**, v.30, n.3-4, p.86-99, 2006.

DAVIDSON, John; SUMMERFELT, Steven T. Solids removal from a cold water recirculating system—comparison of a swirl separator and a radial-flow settler. **Aquacultural Engineering**, v. 33, n. 1, p. 47-61, 2005.

FAO. El estado mundial de la pesca y la acuicultura (SOFIA). 2020.

FORSYTHE, A. HOSLER, K.C. Experiences in constructing and operating cold water recirculating aquaculture facilities for salmon smolt production. **Proceedings of the Fourth International Conference on Recirculating Aquaculture**, Virginia, p. 325 – 334, 2002.

GHISI, D. B. Proposta de um modelo de projeto de filtro rápido bifluxo para tratamento de água de abastecimento. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p.34, 2017.

HAGOPIAN, D. S.; RILEY, J. G. A closer look at the bacteriology of nitrification. **Aquacultural Engineering**, v. 18, n. 4, p. 223-244, 1998.

HEINEN, J. M, HANKINS, J. A, WEBER, A. L, WATTEN, B. J. Um sistema de recirculação de água semifechado para a cultura de alta densidade de truta arco-íris. **The Progressive fish-culturist**, v. 58, n. 1, pág. 22 de novembro de 1996.

HOLDER, J. Retrofit of flow through to reuse/recirculation technology. In: **Proceedings of the 4th International Conference on Recirculating Aquaculture**. 2002.

KUBITZA, Fernando. Sistemas de Recirculação: Sistemas fechados com tratamento e reuso da água. **Panorama da aquicultura**, v. 16, n. 95, p. 15-22, 2006.

LAWSON, Thomas. **Fundamentos da engenharia aquícola**. Springer Science & Business Media, 2013.

LIU, Y.SONG, X.LIANG, Z.PENG, L. Application of CFD modeling to hydrodynamics of CycloBio fluidized sand bed in recirculating aquaculture systems. **Journal of Ocean University of China**, v. 13, n. 1, p. 115-124, 2014.

LIU Y.; HUANG Z.; SONG X.; LEI J.; PENG L.; LIU B. Structure optimization of CycloBiofluidized sand biofilters based on numerical simulation. **Aquacultural Engineering**, vol. 60, p. 18-22, 2015.

LING, Jian; CHEN, Shulin. Impacto do carbono orgânico no desempenho da nitrificação de diferentes biofiltros. **Engenharia aquícola**, v. 33, n. 2, pág. 150-162, 2005.

MARINI, Fabio. Simulação de um leito fluidizado aplicando a técnica CFD baseada na teoria cinética do escoamento granular. 2008. 90 f. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)-Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

MONTAGNE, Michael. Dois incubatórios de recirculação de água quente usados para propagação de espécies ameaçadas de extinção no sistema de drenagem do alto rio Colorado. 2006.

PeixeBR | Associação Brasileira da Piscicultura, 2021. Disponível em: <<https://www.peixebr.com.br/>>. Acesso em: 30 apr. 2021.

RAMIREZ, M. V. Simulação da perda de carga e da eficiência da coleta em ciclones através da fluidodinâmica computacional (CFD). Dissertação (Mestrado)–Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, p. 15-16, 2009.

RIEDEL, Y.M.Z (1995). “**Transferência de oxigênio e parâmetros hidrodinâmicos de um reator de leito fluidizado trifásico**”. Maringá. 187p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá.

RICHTER, C. A.; AZEVEDO NETTO, J. M. Tratamento de água: tecnologia atualizada. São Paulo: E. Blücher, 1991.

SANDU, S. I, BOARDMAN, G. D, WATTEN, B, J. BRAZIL, B. L. Fatores que influenciam a eficiência de nitrificação do filtro de leito fluidizado com um meio de esfera de plástico. **Engenharia Aquacultural**, v. 26, n. 1, pág. 41-59, 2002.

SANT'ANNA, Mikele Cândida Sousa. Simulação hidrodinâmica de um gaseificador de leito fluidizado borbulhante. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

SANT'ANNA, M. C. S., DOS SANTOS CRUZ, W. R., SARMENTO, S. M., SILVA, G. F., MEDRONHO, R. A., LUCENA, S. Hidrodinâmica de um gaseificador de leito fluidizado borbulhante: validação da simulação. **Scientia Plena**, v. 12, n. 1, 2016.

SANT'ANNA, M. C. S., DOS SANTOS CRUZ, W. R., SILVA, G. F., MEDRONHO, R. A., LUCENA, S. Analyzing the fluidization of a gas-sand-biomass mixture using CFD techniques. **Powder Technology**, v. 316, p. 367-372, 2017.

SUMMERFELT, S. T. Engineering design of a water reuse system. **Walleye Culture**

Manual, NRAC Culture Series, v. 101, p. 277-309, 1996.

SUMMERFELT, ST; CLEASBY, JL. Uma revisão da hidráulica em filtros biológicos de leito fluidizado. **Transações da ASAE**, v. 39, n. 3, pág. 1161-1173, 1996.

SUMMERFELT, S. T.; WADE, E. M. Fluidized-sandbiofiltersinstalledattwofarms. **Recirc. Today**, v. 1, n. 1, p. 18-21, 1998.

SUMMERFELT, S.T.; BEBAK-WILLIAMS, J. TSUKUDA, S. Sistemas controlados: reuso e recirculação de água. **Gestão de incubadoras de peixes**, v. 40, p. 285-295, 2001.

SUMMERFELT, S. T., DAVIDSON, J. W., WALDROP, T. B., TSUKUDA, S. M., BEBAK-WILLIAMS, J. Um sistema de reaproveitamento parcial para aquicultura em água fria. **Engenharia Aquacultural**, v. 31, n. 3-4, pág. 157-181, 2004.

SUMMERFELT, S. T.; DAVIDSON, J.; HELWIG, N. Evaluation of a full-scale CycloBiofluidized-sandbiofilter in a coldwater recirculating system. In: **Proceedings of the Fifth International Conference on Recirculating Aquaculture, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA**. 2004. p. 227-237.

SUMMERFELT, Steven T. Design and management of conventional fluidized-sandbiofilters. **Aquacultural Engineering**, v. 34, n. 3, p. 275-302, 2006.

TANVEER, M., MOULICK, S., MUKHERJEE, C. K.. Mathematical model for goldfish recirculating aquaculture system (GRAS). **Aquacultural Engineering**, v. 90, p. 102092, 2020.

TIMMONS, M. B., EBELING, J. M., WHEATON, F. W., SUMMERFELT, S. T., & VINCI, B. J. Sistemas de recirculación para la acuicultura. **Santiago de Chile (Chile): Fundación Chile**, 2002.

TSUKUDA, Scott et al. Heterotrophic denitrification of aquaculture effluent using fluidized sand biofilters. **Aquacultural Engineering**, v. 64, p. 49-59, 2015.

WEAVER, Dallas E. Projeto e operações de biofiltros de leito fluidizado de mídia fina para atender aos requisitos de água oligotrófica. **Engenharia aquícola**, v. 34, n. 3, pág. 303-310, 2006.

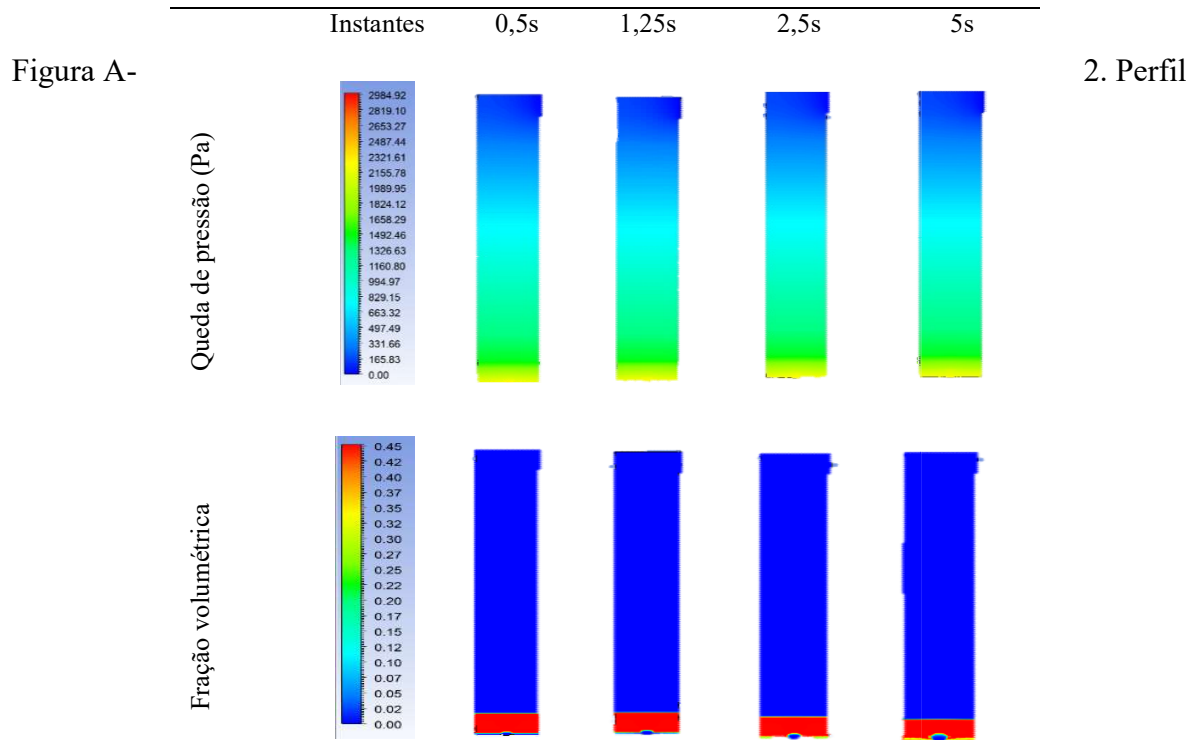
WILTON, S. J. Design of a 50 T salmon smolt operation. In: **Proceedings of the 4th International Conference on Recirculating Aquaculture**. 2002.

YU, H. and RITTMANN, E. B (1997). "Predicting bed expansion and phase holdups for three-phase fluidized-bed reactors with and without biofilm. **Water Research**, v.31, n.10, p.2604-2616".

ZHU, Songming; CHEN, Shulin. Efeitos do carbono orgânico na taxa de nitrificação em biofiltros de filme fixo. **Engenharia Aquacultural**, v. 25, n. 1, pág. 1-11, 2001.

APÊNDICE A – SIMULAÇÕES DA GEOMETRIA A

Figura A-1. Perfil Longitudinal de fração volumétrica e queda de pressão do ensaio 1.



Longitudinal de fração volumétrica e queda de pressão do ensaio 2.

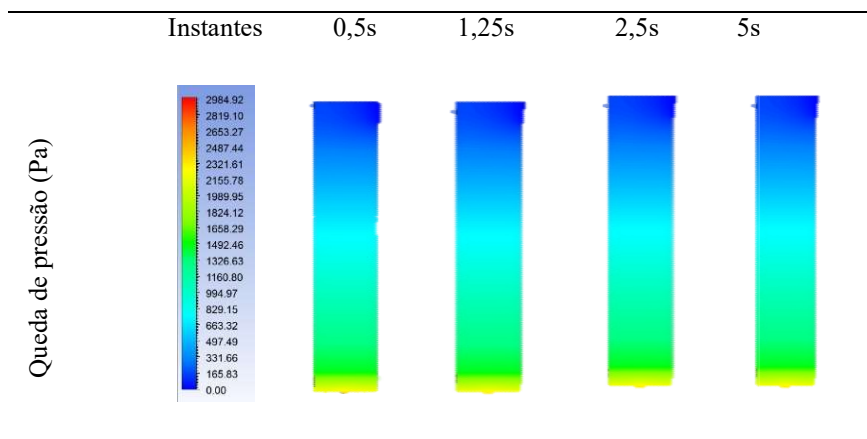
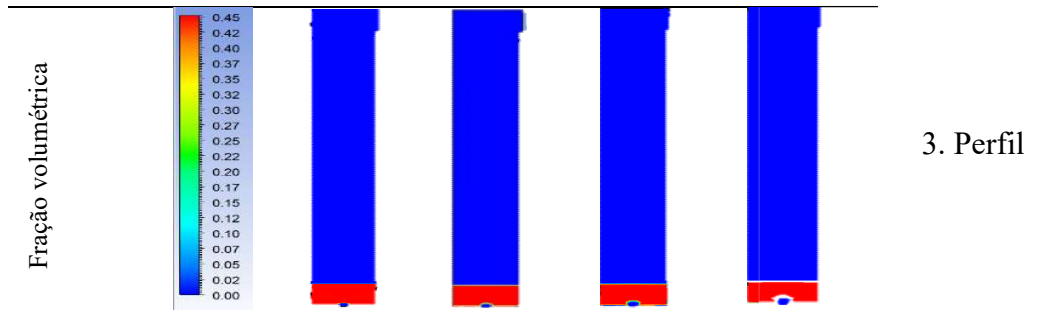


Figura A-



Longitudinal de fração volumétrica e queda de pressão do ensaio 3.

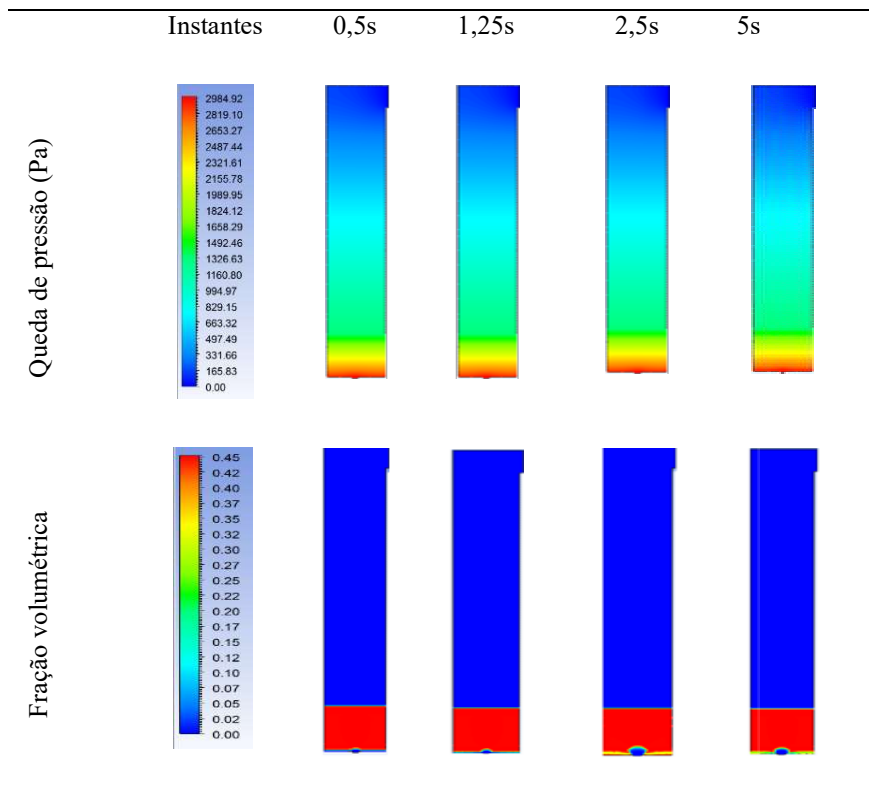
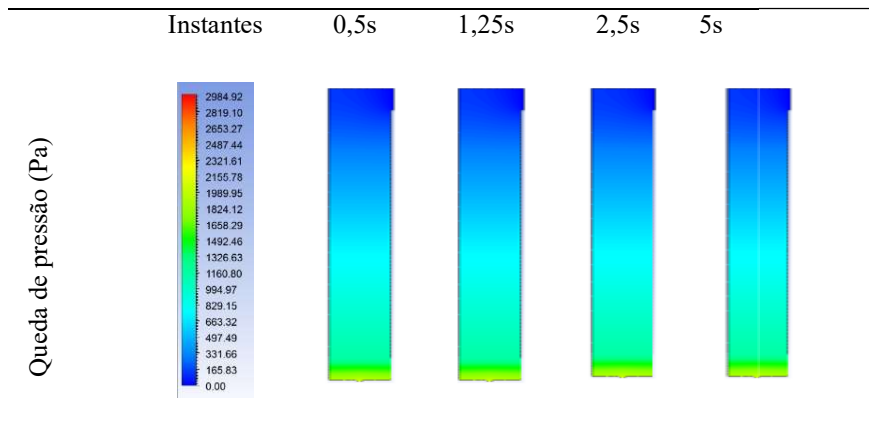


Figura A-4. Perfil Longitudinal de fração volumétrica e queda de pressão do ensaio 4.



Fração volumétrica

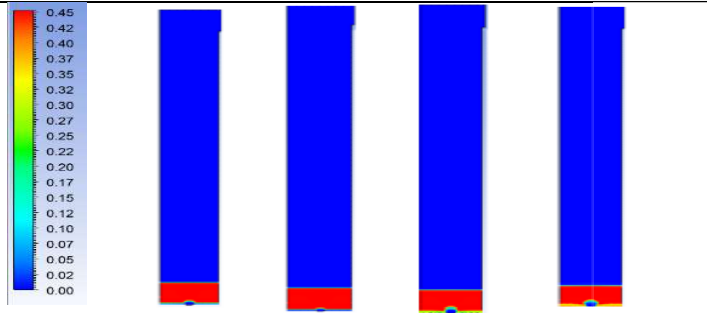


Figura A-5. Perfil Longitudinal de fração volumétrica e queda de pressão do ensaio 5.

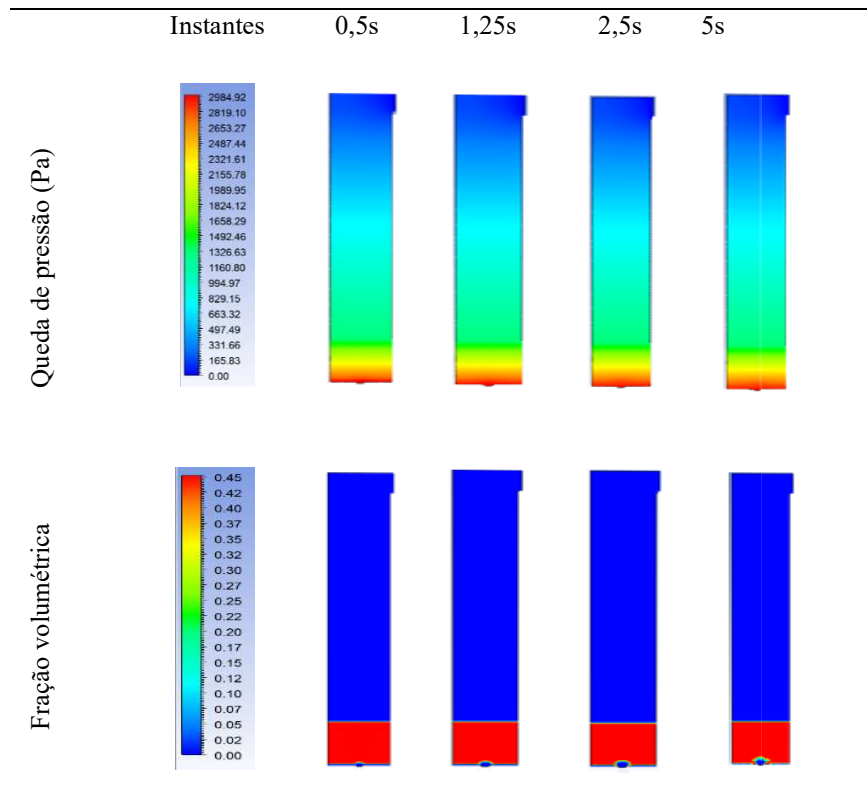


Figura A-6. Perfil Longitudinal de fração volumétrica e queda de pressão do ensaio 6.

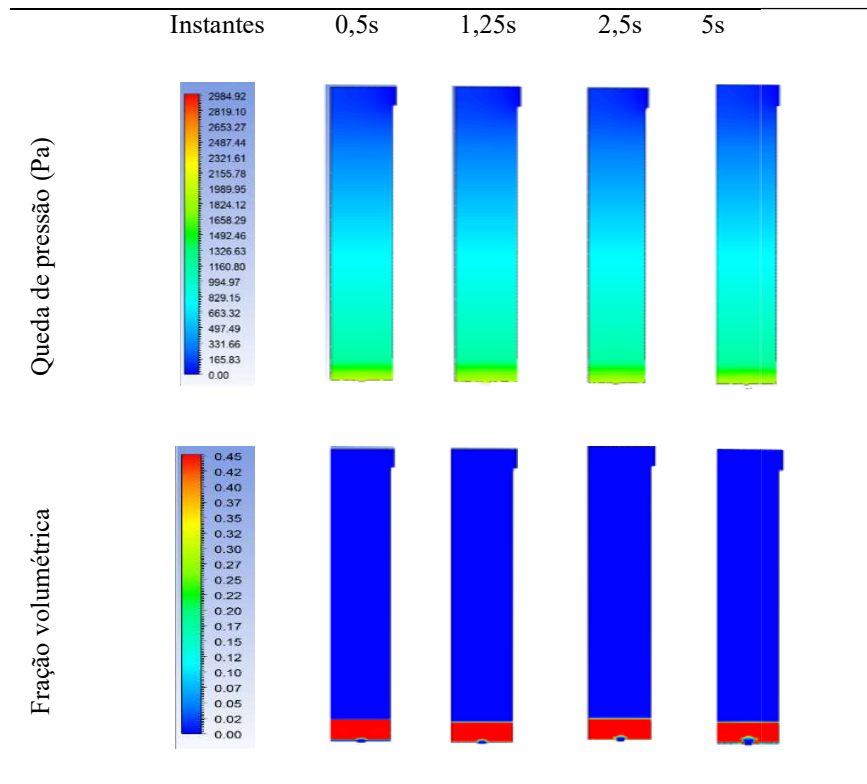
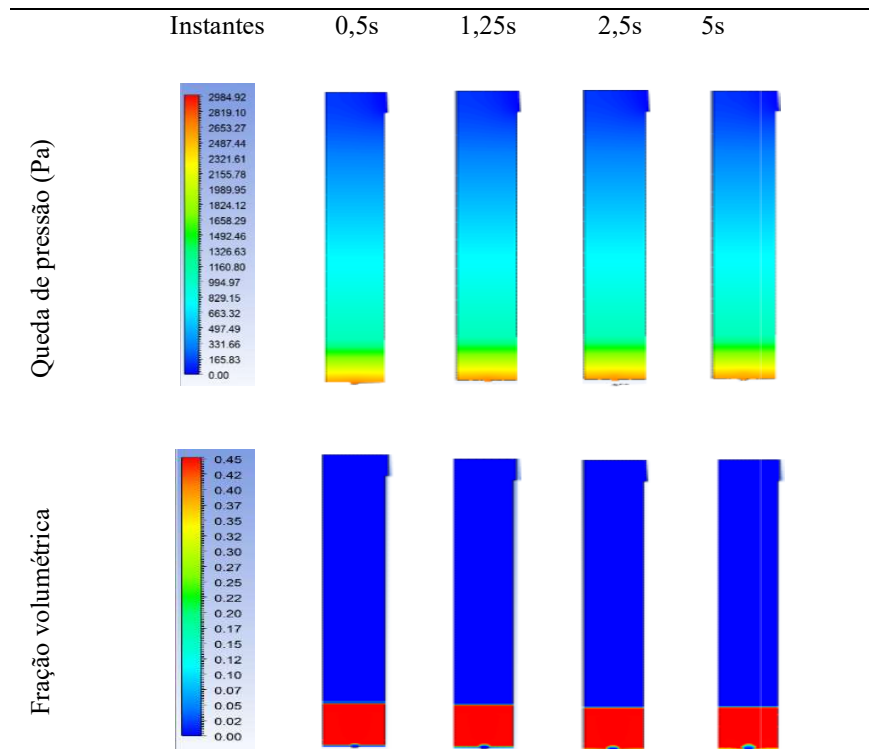


Figura A-

7. Perfil

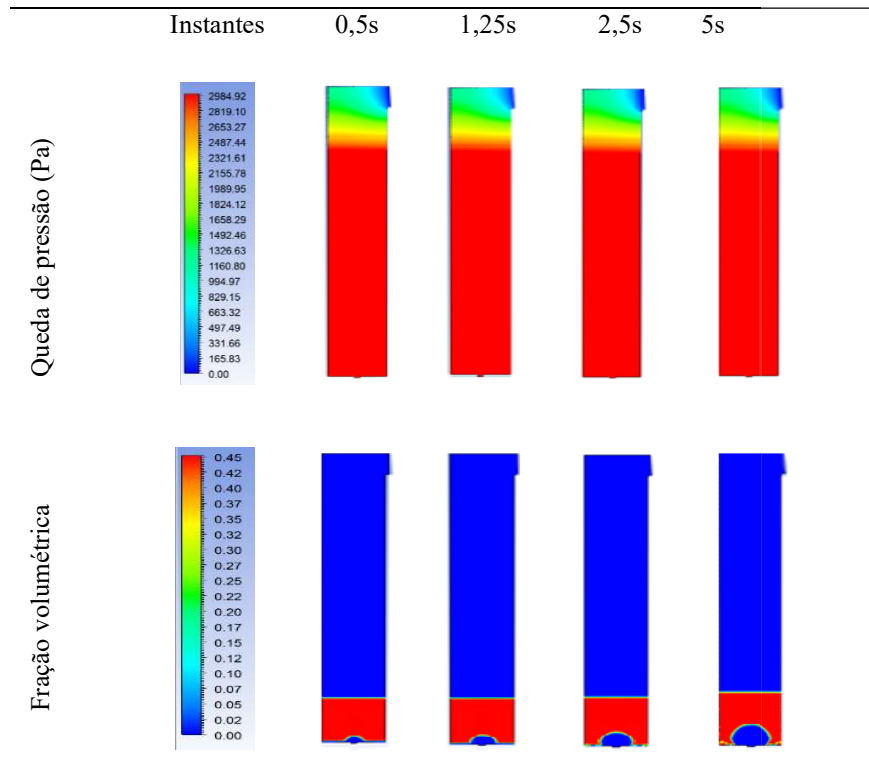
Longitudinal de fração volumétrica e queda de pressão do ensaio 7.

Figura A-



Longitudinal de fração volumétrica e queda de pressão do ensaio 8.

Figura A-



Longitudinal de fração volumétrica e queda de pressão do ensaio 9.

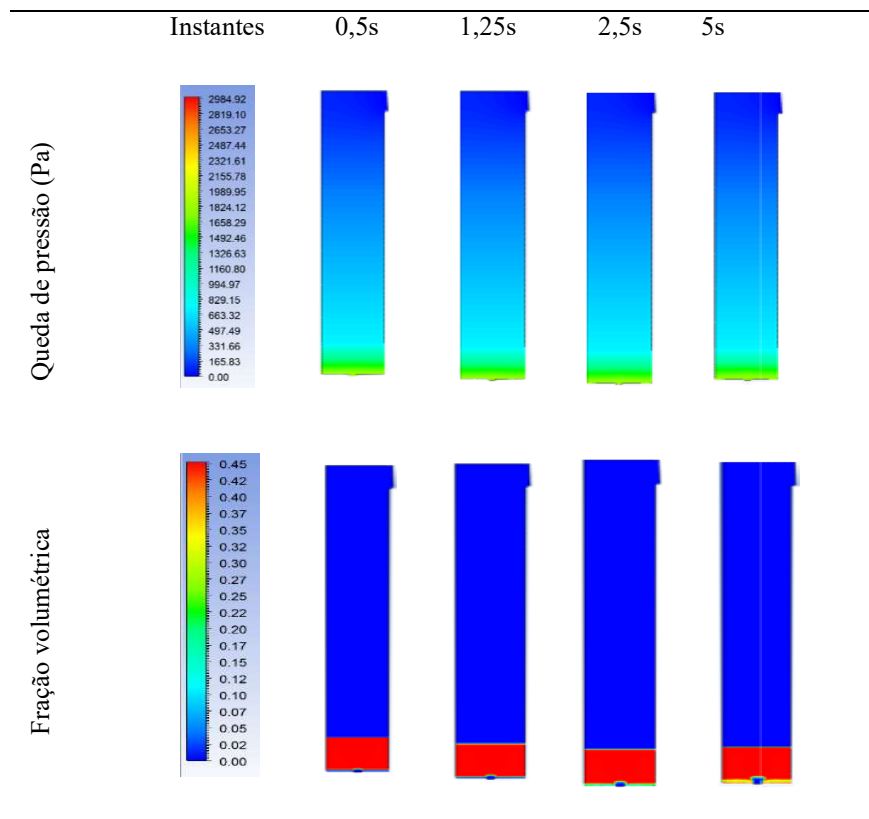


Figura A-10. Perfil Longitudinal de fração volumétrica e queda de pressão do ensaio 10.

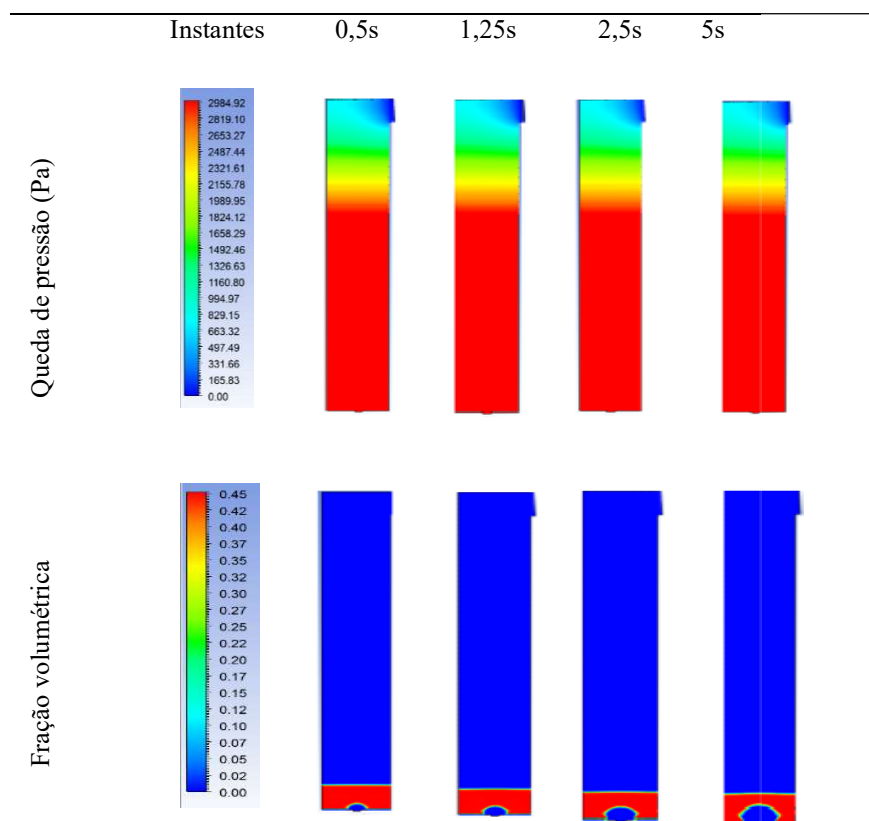


Figura A-11. Perfil Longitudinal de fração volumétrica e queda de pressão do ensaio 11.

11. Perfil

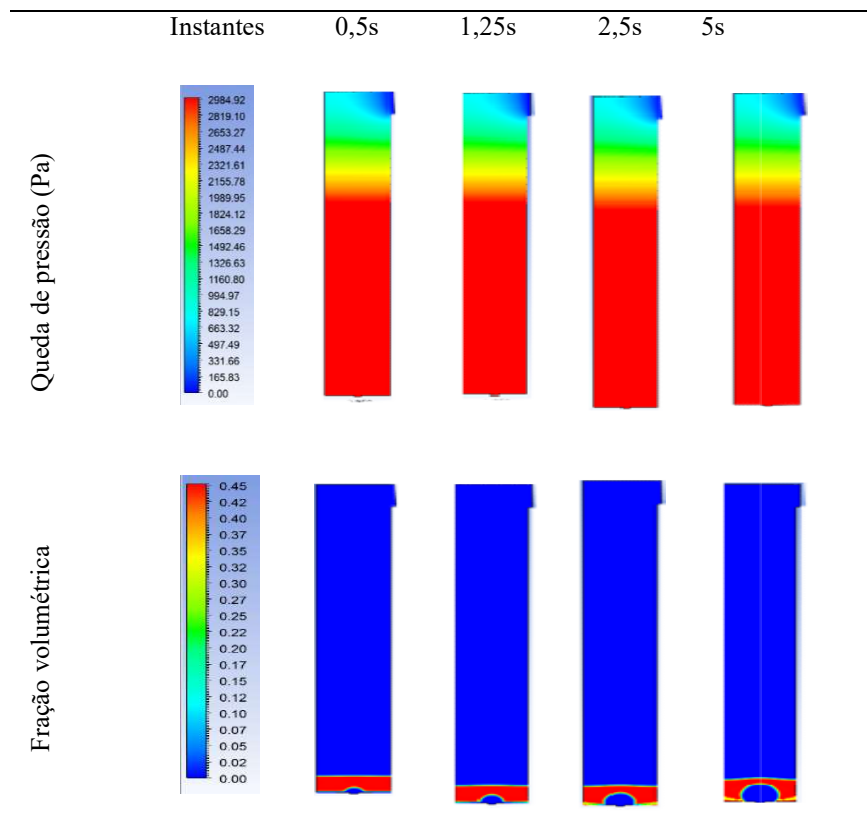


Figura A-12. Perfil Longitudinal de fração volumétrica e queda de pressão do ensaio 12.

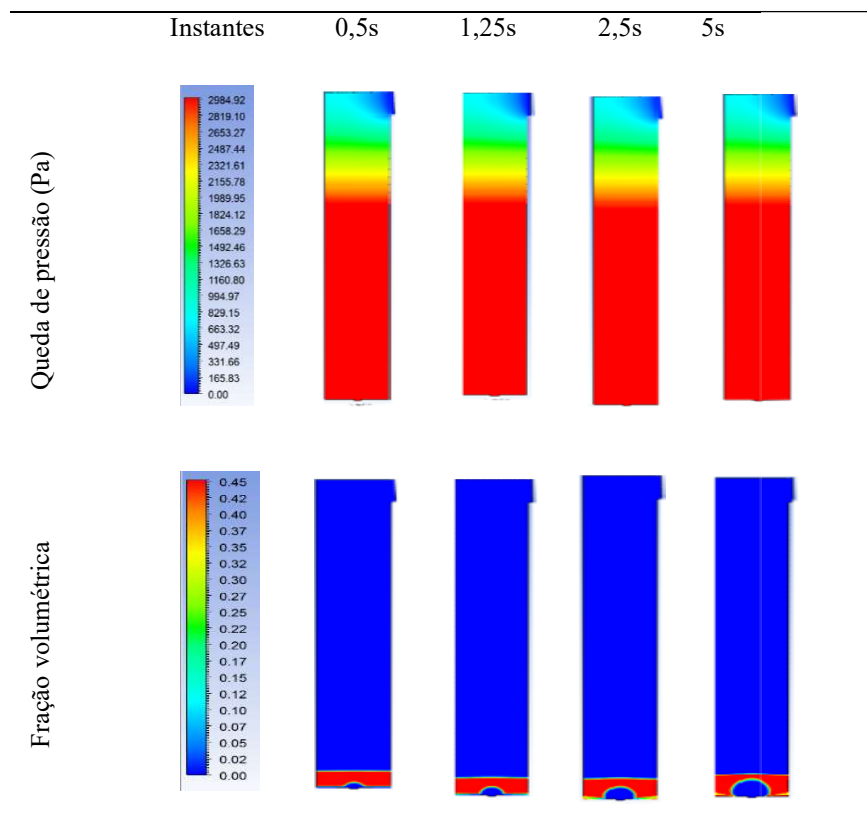


Figura A-13. Perfil Longitudinal de fração volumétrica e queda de pressão do ensaio 13.

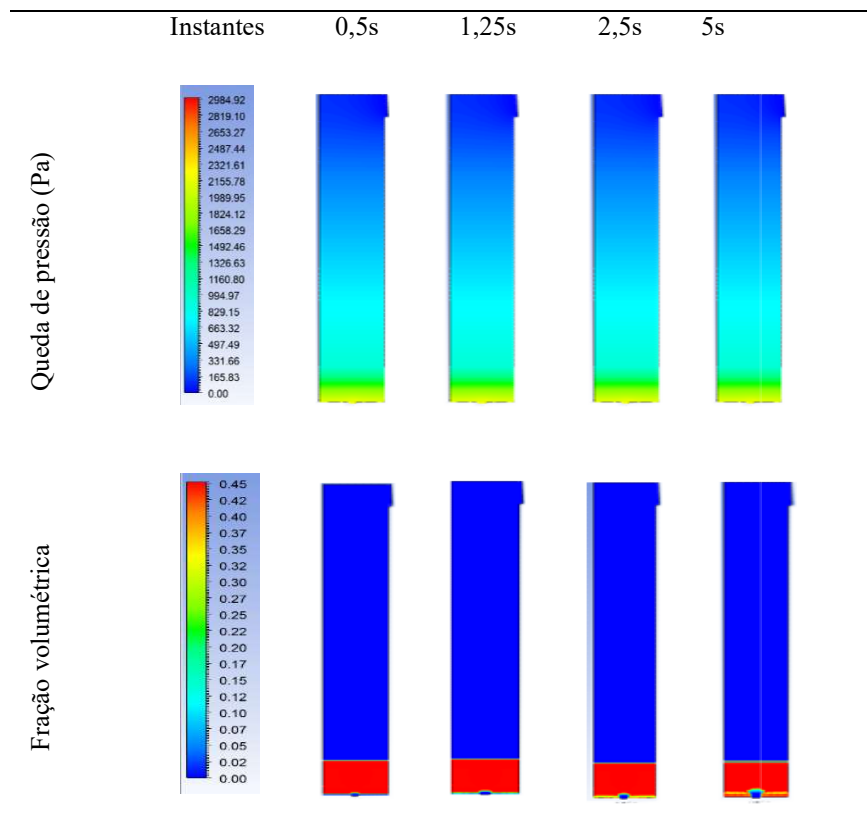
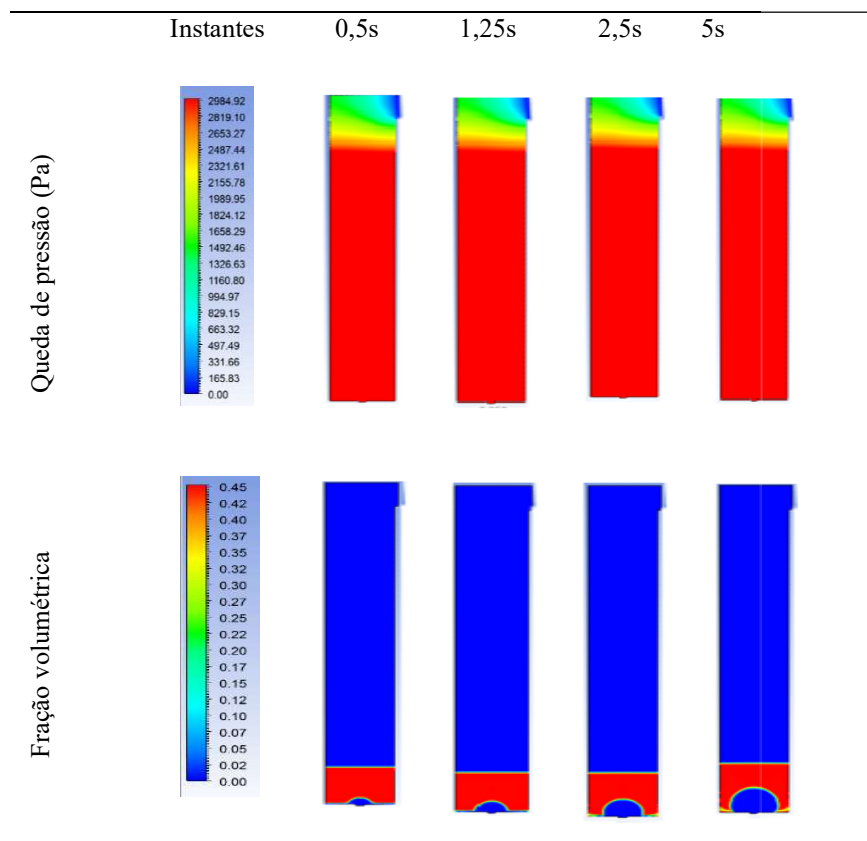
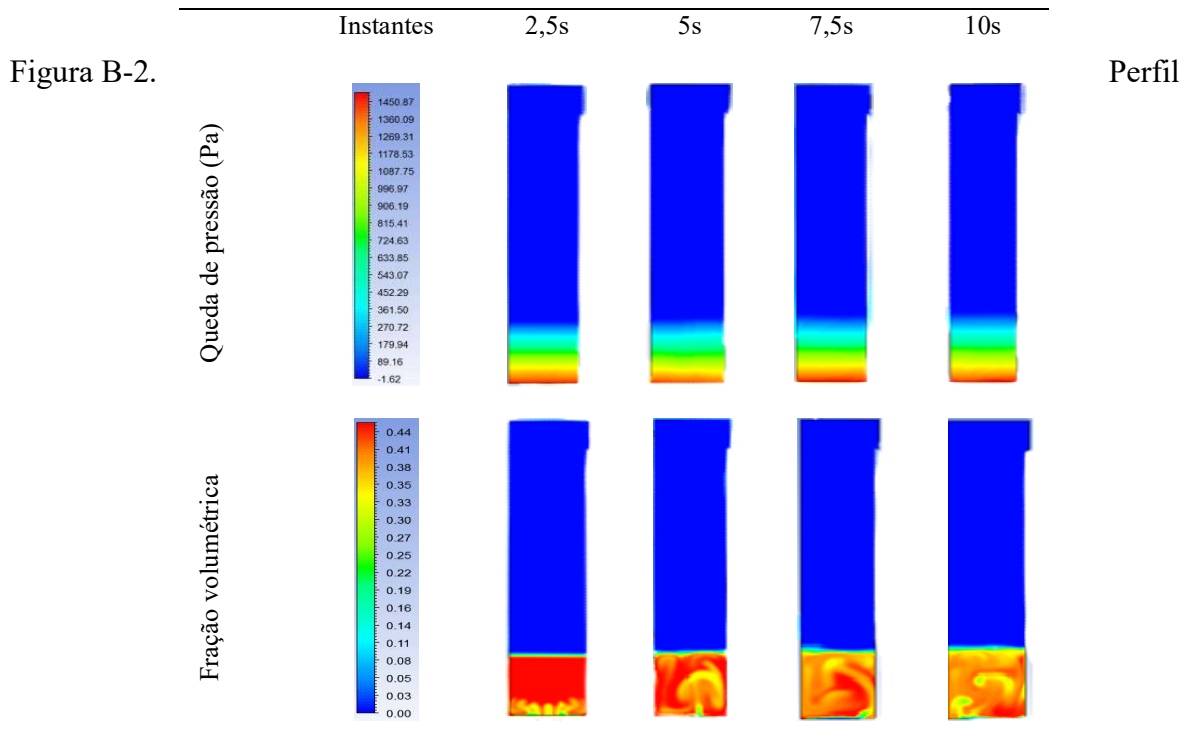


Figura A-14. Perfil Longitudinal de fração volumétrica e queda de pressão do ensaio 14.



APÊNDICE B – SIMULAÇÕES DA GEOMETRIA B

Figura B-1. Perfil Longitudinal de fração volumétrica e queda de pressão da velocidade 0,01 m.s⁻¹.



Longitudinal de fração volumétrica e queda de pressão da velocidade 0,02m.s⁻¹.

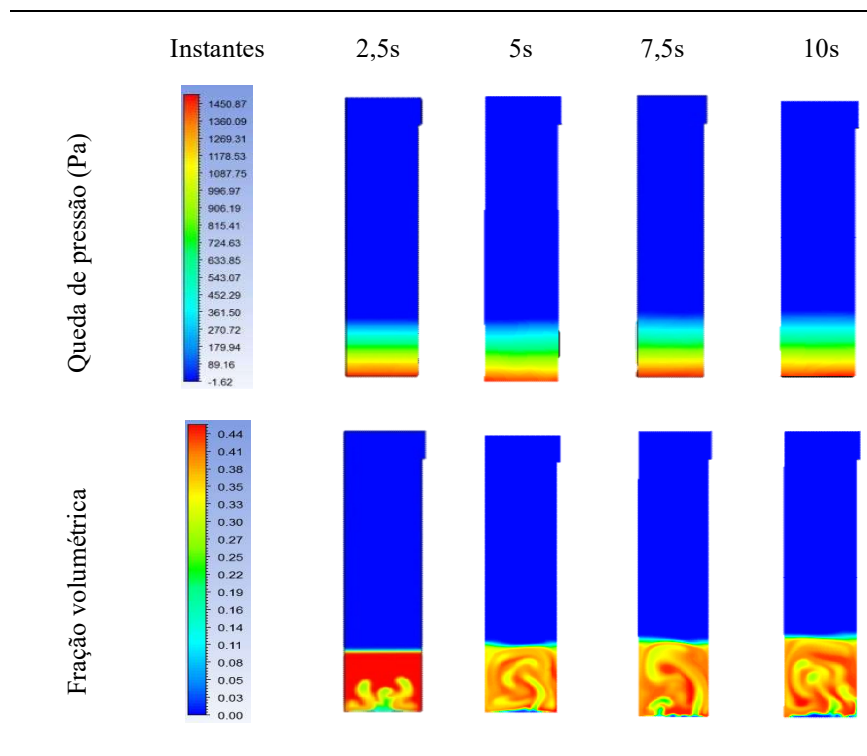
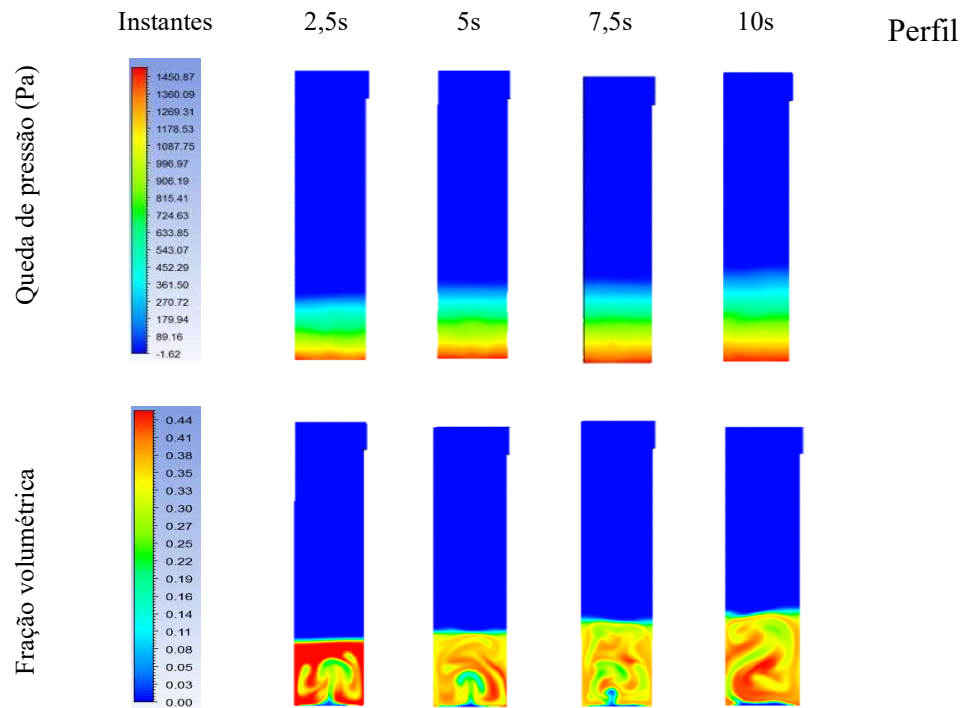


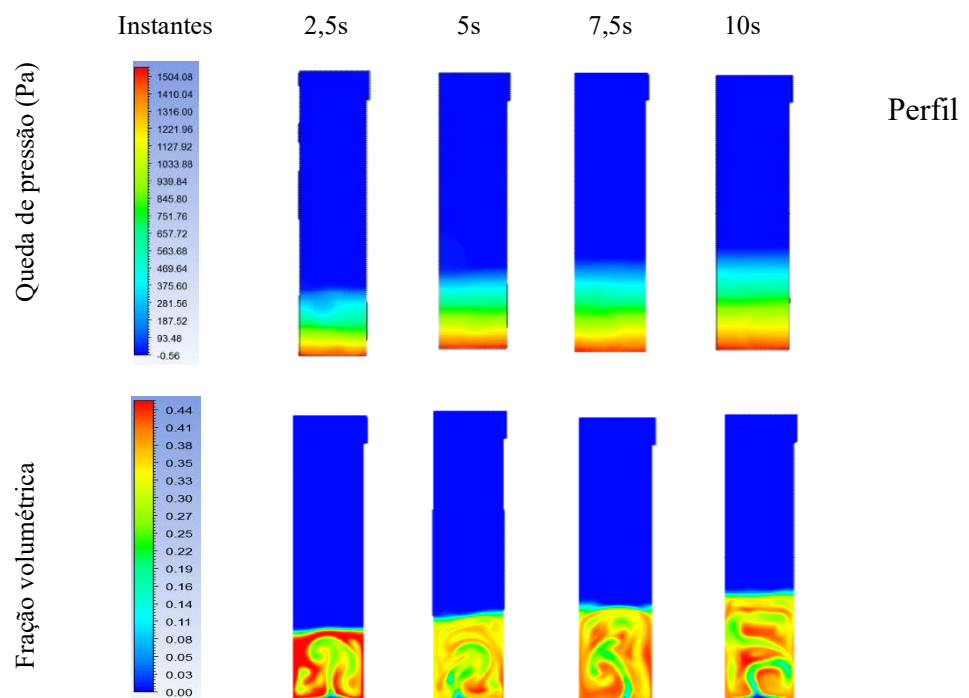
Figura B-3. Perfil Longitudinal de fração volumétrica e queda de pressão da velocidade 0,03m.s⁻¹.

Figura B-4.



Longitudinal de fração volumétrica e queda de pressão da velocidade $0,04\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

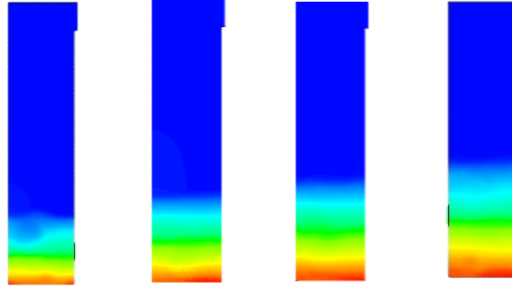
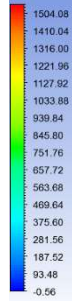
Figura B-5.



Longitudinal de fração volumétrica e queda de pressão da velocidade $0,05\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Instantes 2,5s 5s 7,5s 10s

Queda de pressão (Pa)



Fração volumétrica

