



UNESP – Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita Filho
Faculdade de Engenharia de Bauru
Doutorado em Engenharia Mecânica



***AVALIAÇÃO DO FENÔMENO DE SLOSHING EM
RESERVATÓRIOS DE PULVERIZADORES AGRÍCOLAS
UTILIZANDO UMA ANÁLISE NUMÉRICA (CFD)***

GUSTAVO BARBOSA MICHELI

Bauru

Dezembro de 2021



UNESP – Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita Filho
Faculdade de Engenharia de Bauru
Doutorado em Engenharia Mecânica



***AVALIAÇÃO DO FENÔMENO DE SLOSHING EM
RESERVATÓRIOS DE PULVERIZADORES AGRÍCOLAS
UTILIZANDO UMA ANÁLISE NUMÉRICA (CFD)***

GUSTAVO BARBOSA MICHELI

Orientador: Prof. Dr. Vicente Luiz Scalon

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Bauru da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Bauru

Dezembro de 2021

Micheli, Gustavo Barbosa.

Avaliação do fenômeno de sloshing em reservatórios de pulverizadores agrícolas utilizando uma análise numérica (CFD) / Gustavo Barbosa Micheli, 2021
83 f.

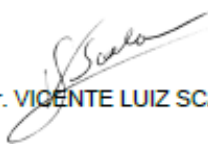
Orientador: Vicente Luiz Scalon

Tese (Doutorado)- Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2021

1. Sloshing. 2. Pressão de impacto 3. Fluidodinâmica computacional. 4. Pulverização agrícola. 5. Reservatórios com defletores I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE GUSTAVO BARBOSA MICHELI, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 07 dias do mês de dezembro do ano de 2021, às 09:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de GUSTAVO BARBOSA MICHELI, intitulada **AVALIAÇÃO DO FENÔMENO DE SLOSHING EM RESERVATÓRIOS DE PULVERIZADORES AGRÍCOLAS UTILIZANDO UMA ANÁLISE NUMÉRICA (CFD)**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. VICENTE LUIZ SCALON (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. CELSO LUIZ DA SILVA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. SANTIAGO DEL RIO OLIVEIRA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. KAMAL ABDEL RADI ISMAIL (Participação Virtual) do(a) Departamento de Energia / Faculdade de Engenharia Mecânica - UNICAMP, Prof. Dr. JOAO BATISTA CAMPOS SILVA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP. Após a exposição pelo doutorando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: Aprovado . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.


Prof. Dr. VICENTE LUIZ SCALON

Dedicatória

a Deus

à minha esposa Josiane

aos meus pais Reinaldo e Zilda

às minhas filhas Beatriz e Sofia

aos meus irmãos

aos meus professores

aos meus amigos

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me propiciado saúde e dedicação, além de oportunidades de aprendizado.

Ao Prof. Dr. Alcides Padilha, que me acompanhou desde o período de mestrado e continuou me auxiliando, orientando e participando ativamente no desenvolvimento dessa tese de doutorado.

Ao Prof. Dr. Vicente Luiz Scalon, pela atenção e orientação despendidas durante toda a realização deste trabalho.

À UNESP – Universidade Estadual Paulista, por me transmitir conhecimento de maneira adequada e me possibilitar avanço técnico desde a graduação em Engenharia Mecânica.

À empresa Máquinas Agrícolas Jacto S/A que permitiu o uso de informações para a realização deste trabalho.

À minha família, pela paciência, dedicação e incentivo nos momentos mais difíceis.

Resumo

MICHELI, G. B., 2021. **Avaliação do fenômeno de sloshing em reservatórios de pulverizadores agrícolas utilizando uma análise numérica (CFD)**. Tese de Doutorado (Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Bauru, 83p.

O fenômeno de *sloshing* de um líquido em reservatórios parcialmente cheios, causado por mudanças bruscas e repentinas de um veículo em movimento, pode impactar na integridade estrutural do reservatório e, ao mesmo tempo, na estabilidade dinâmica do veículo. No caso de pulverizadores agrícolas, os efeitos do fenômeno de *sloshing* no reservatório de calda de pesticidas são investigados nesse trabalho. Os mesmos ocorrem devido à desaceleração repentina da máquina, e foram analisados sob três níveis de enchimento, 25%, 50% e 75%. As distribuições de pressão na parede do reservatório ao longo do tempo foram avaliadas pelo uso de modelos multifásicos transientes (água e ar como gás ideal) com a consideração de superfície livre num modelo homogêneo. Foi possível verificar o comportamento das ondas de *sloshing*. A condição de enchimento de 75% da capacidade do reservatório foi a que gerou valores mais altos de pressão na parede do mesmo. A eficiência de dois arranjos com diferentes tipos de defletores verticais para reduzir a pressão de impacto foi numericamente investigada. A tensão de cisalhamento na parede inferior do reservatório com a inclusão desses arranjos propostos foi analisada utilizando modelos em regime permanente com agitação mecânica, considerando o reservatório totalmente cheio. A solução proposta composta por dois defletores verticais parciais e com um espaço entre eles foi a mais eficaz. Esse arranjo promoveu uma maior redução da pressão de impacto na parede do reservatório e outras instabilidades devido ao *sloshing*, e ao mesmo tempo manteve os resultados de agitação da calda no caso do reservatório sem os defletores.

Palavras-chave: *sloshing*, pressão de impacto, fluidodinâmica computacional, pulverização agrícola, reservatório com defletores.

Abstract

MICHELI, G. B., 2021. **Evaluation of the sloshing effects in sprayer tanks using the numerical analysis (CFD)**. Doctoral Thesis in Mechanical Engineering, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Bauru, 83p.

The sloshing phenomenon occurs in partially filled tankers due to sudden movement can affect the tank structure integrity and impair the dynamic stability of the tanker. The effects of sloshing phenomena in a spray mixture tank due to acceleration or deceleration of the agricultural vehicle is investigated under three filling levels of 25%, 50%, and 75%. The pressure time distributions on the tank wall were evaluated by using a multiphase transient model (water and air as an ideal gas) and a free surface flow in a homogeneous model. It was possible to verify the wave behavior of sloshing. The condition of 75% tank filling volume generated the highest pressure on the tank wall. The effectiveness of two types of vertical baffles in suppressing pressure was numerically investigated. Shear stress on the tank bottom wall under these proposed arrangements was analyzed by steady-state models and mechanical agitation, considering a filled tank. The proposed solution based on two partial vertical baffles and a central *gap* was the most effective. It promotes the higher reduction of wall impact pressure and other sloshing instabilities and maintains similar results of mixture agitation of the tank without baffles.

Keywords: sloshing, impact pressure, CFD analysis, spray tank, tank with baffles.

ÍNDICE

LISTA DE SÍMBOLOS	vii
LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE TABELAS.....	xv
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos	6
1.2 Organização do trabalho.....	7
CAPÍTULO 2.....	8
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
CAPÍTULO 3.....	23
MODELAGEM MATEMÁTICA	23
3.1 Caracterização do fenômeno de <i>sloshing</i>	23
3.2 Equacionamento da solução numérica	25
3.3 Modelo de turbulência.....	27
3.4 Modelamento da Superfície Livre	31
3.5 Configuração dos modelos numéricos.....	34
3.6 Qualidade dos elementos das malhas geradas	34
3.7 Variáveis de saída na utilização da CFD.....	36
CAPÍTULO 4.....	38
MODELO COMPUTACIONAL	38

4.1 Modelos para a análise de <i>sloshing</i>	39
4.2 Modelos para a análise de agitação	43
4.3 Critérios de Convergência	48
CAPÍTULO 5	49
RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
5.1 Avaliação das incertezas numéricas	49
5.2 Validação da frequência natural e modos de ressonância em função da teoria linear...51	
5.3 Resultados dos modelos em regime transiente – Efeitos do <i>sloshing</i>	53
5.4 Resultados dos modelos em regime permanente	66
CAPÍTULO 6	76
CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
6.1 Conclusões.....	76
6.2 Sugestões para trabalhos futuros	77
6.3 Publicações originadas a partir do presente trabalho.....	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Latinas

n	número do modo de ressonância do fluido
g	aceleração da gravidade [m/s ²]
L	dimensão do reservatório na direção z [m]
h	nível de enchimento do reservatório [m]
C_ε	constante do modelo k - ε padrão
b_i	forças de campo [N]
F	força de superfície [N]
k	energia cinética turbulenta [m ² /s ²]
$k_{\alpha\beta}$	curvatura de superfície da interface
M_α	soma das forças de interface [N]
P	pressão total [Pa]
P_{est}	pressão estática [Pa]
P_k	taxa de produção da energia cinética turbulenta [Pa/s]
P_{kb}	representa a influência das forças de corpo na turbulência [Pa/s]
$P_{\varepsilon b}$	representa a influência das forças de corpo na turbulência [Pa/s]
t	tempo [s]
u_t	velocidade do escoamento tangencial à parede [m/s]
U	vetor velocidade [m/s]
F	força de superfície [N]
f	valor da função de uma variável
f_e	vetor do centroide do elemento ao centroide da face do elemento
A_e	vetor normal da face do elemento
c_e	vetor do centroide do elemento ao centroide do elemento vizinho

r	fração volumétrica da fase primária
p	ordem de convergência do método numérico
n_e	número de elementos da malha
r_{I-II}	taxa de refinamento da malha
X_i	variável genérica, medida pelo sistema de medição
y^+	distância adimensional com relação à parede
x	vetor direção espacial e coordenada cartesiana espacial [m]
y	coordenada cartesiana espacial [m]
z	coordenada cartesiana espacial [m]

Letras Gregas

δ	delta de Kronecker
$\delta_{\alpha\beta}$	função delta da interface
ε	taxa de dissipação da energia cinética turbulenta [m^2/s^3]
μ	viscosidade dinâmica [Pa.s]
μ_t	viscosidade turbulenta [Pa.s]
ρ	massa específica [kg/m^3]
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	constantes do modelo k - ε padrão
τ	tensor de tensão viscoso [Pa]
Ω	vetor velocidade angular [rad/s]
α	fase primária (fluido primário)
β	fase secundária (fluido secundário)
φ	diferença relativa de uma função f
ω_n	frequência natural de <i>sloshing</i> [Hz]
$\eta_{\alpha\beta}$	vetor normal da interface com sentido do fluido primário para o fluido secundário
σ	coeficiente de tensão superficial [N/m]
θ	qualidade ortogonal do elemento
τ_{xy}	tensão de cisalhamento do fluido [N/m^2]

Símbolos e operadores matemáticos

∂	operador diferencial
Δ	diferença de uma variável
$\rightarrow$	vetor
∇	gradiente de uma variável

LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
SFP	<i>Spent Fuel Pool</i>
RNG	<i>Re-Normalization Group</i>
RTM	<i>Resin Transfer Molding</i>
ANCF	<i>Absolute Nodal Coordinate Formulation</i>
MBS	<i>Multi Body System</i>
CA	<i>Constant Acceleration</i>
SOE	<i>Single Oscillatory Excitation</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transformation</i>
RANS	<i>Reynolds Averaged Navier-Stokes</i>
SST	<i>Shear Stress Transport</i>
GGI	<i>General Grid Interface</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplos de pulverizadores agrícolas automotrizes disponíveis no mercado (Adaptado de Canal Rural, 2016).	1
Figura 2 – Formações de ondas e efeitos do sloshing (Adaptado de GODDERIDGE, 2006).	3
Figura 3 – Efeitos do sloshing: (a) flip-through; (b) salto hidráulico; (c) impacto na parede superior e formação de bolhas de ar; (d) efeito acumulativo de salto hidráulico, flip through e bolhas de ar (Adaptado de JOSHI et al., 2017).	3
Figura 4 – (a) Modelo 3D do reservatório de 4500 litros com agitação mecânica; e (b) detalhe do agitador mecânico de hélice.	5
Figura 5 – Simulação de sloshing num caso de ressonância com mercúrio (à esquerda) e água (à direita): (a) sloshing não linear; (b) gotículas são ejetadas; (c) formação de turbilhões; (d) quebra de ondas (Adaptado de MYRILLAS et al., 2017).	9
Figura 6 – Movimentos de sloshing do modelo com o nível 0,23m de enchimento para frequências de excitação de 5 Hz e 10 Hz (Adaptado de PARK et al., 2019).	10
Figura 7 – Elevação de sloshing do modelo com o nível 0,23m de enchimento para frequências de excitação de 2 Hz, 3 Hz, 4 Hz e 5 Hz (Adaptado de PARK et al., 2019).	11
Figura 8 – (a) Esquema de um caminhão tanque de 6 eixos; (b) Modelo de roll de um tanque suspenso de um veículo rodoviário (KOLAEI et al., 2014).	12
Figura 9 – (a) Geometria elíptica (ou circular quando $a = b$); (b) geometria oval modificada; e (c) triângulo de Reuleaux (KOLAEI et al., 2014).	12
Figura 10 – (a) Sloshing longitudinal devido à frenagem do veículo; (b) sloshing lateral devido ao lane change para alguns instantes de simulação (Adaptado de NICOLSEN et al., 2017).	13
Figura 11 – Sloshing de um reservatório em movimento sob excitação externa oscilatória: (a) resultados experimentais; (b) sem o cilindro; e (c) com o cilindro (Adaptado de IRANMANESH e PASSANDIDEH-FARD, 2017).	15
Figura 12 – Comportamento da superfície livre e do campo de pressão nas condições: (a) abertura no fundo do reservatório; e (b) abertura 30 mm acima (Adaptado de CELIS et. al, 2017).	16

Figura 13 – (a) Comparação da força de sloshing na parede rígida do reservatório considerando os defletores horizontais elásticos e rígidos; e (b) FFT correspondente no caso de ressonância estrutural (Adaptado de QIN et. al, 2019).	17
Figura 14 – Vistas em 3D do sloshing em três diferentes instantes para os modelos com defletores perfurados com otimizações da área de abertura (Adaptado de BELLEZI et. al, 2019)......	18
Figura 15 – Sloshing com diferentes camadas flutuantes de esferas plásticas nas condições: (a) sem camadas; (b) 1 camada; (c) 2 camadas; (d) 3 camadas; e (e) 4 camadas (ZHANG et. al, 2019).	19
Figura 16 – Comparação numérico-experimental entre o perfil de tensão de cisalhamento e as regiões de acúmulo de resíduos na parte plana da parede inferior do reservatório (MICHELI et. al, 2015)......	20
Figura 17 – Estimativa das trajetórias das partículas para quatro classes de diferentes para o reservatório sem e com defletores (Adaptado de PUKKELLA et. al, 2019)......	21
Figura 18 – Representação da nuvem de partículas sólidas: (a) rotor de 4 pás simples; (b) arranjo 1 com pás fractais; e (c) arranjo 2 com pás fractais (GU et. al, 2019).	21
Figura 19 – Classificação das ondas de sloshing (Adaptado de GODDERIDGE, 2006)......	23
Figura 20 – Diagrama esquemático do fluido num reservatório retangular (Adaptado de PARK et al., 2019).	24
Figura 21 – Vetores empregados no cálculo de qualidade ortogonal (SILVA, 2016).	35
Figura 22 – Referências de qualidade ortogonal (ANSYS, 2017).	36
Figura 23 - Posições dos níveis de enchimento do reservatório de 4500 litros e dos pontos de captura da pressão na parede frontal.	39
Figura 24 - Aceleração e desaceleração na direção z no início do período da simulação.	40
Figura 25 - Propostas para redução dos efeitos de sloshing: (a) arranjo 1, e (b) arranjo 2.	41
Figura 26 - Malhas do reservatório para avaliação do sloshing nas condições: (a) sem defletores, (b) com o arranjo 1, e (c) com o arranjo 2.	42

Figura 27 - Modelo 3D do agitador mecânico na montagem do reservatório.	44
Figura 28 – Malhas do reservatório para a avaliação da agitação nas condições: (a) sem defletores, (b) com o arranjo 1, e (c) com o arranjo 2.	46
Figura 29 – Interfaces do domínio rotativo.	47
Figura 30 – Malha do domínio rotativo do agitador mecânico.	47
Figura 31 – FFT da pressão sob P1 para o reservatório com nível 75% sob a ação da aceleração proposta para os modelos.	52
Figura 32 - Vistas em 3D do sloshing num reservatório de pulverizador preenchido com 25% de sua capacidade: (a) primeiro impacto na parede frontal; (b) primeiro impacto na parede traseira.	54
Figura 33 - Vistas em 3D do sloshing num reservatório de pulverizador preenchido com 50% de sua capacidade: (a) primeiro impacto na parede frontal; (b) primeiro impacto na parede traseira.	54
Figura 34 - Vistas em 3D do sloshing num reservatório de pulverizador preenchido com 75% de sua capacidade: (a) primeiro impacto na parede frontal; (b) primeiro impacto na parede traseira.	54
Figura 35 - Pressão no tempo na parede frontal do reservatório sem defletores para três diferentes níveis de enchimento: (a) 25%; (b) 50% e (c) 75%.	57
Figura 36 - Vistas em 2D das ondas de sloshing no reservatório com nível 75% sem defletores.	58
Figura 37 - Gradiente de pressão na parede do reservatório (vistas lateral e frontal) devido à aceleração na direção do eixo z nos seguintes instantes de simulação: (a) 1,2s; e (b) 3,1s.	58
Figura 38 - Pressão no tempo na parede frontal do reservatório com nível 75%, nas seguintes condições: (a) sem defletores; (b) arranjo 1; e (c) arranjo 2.	59
Figura 39 - Vistas em 3D do sloshing num reservatório de pulverizador preenchido com 75% de sua capacidade configurado com o arranjo 1.	61
Figura 40 - Vistas em 3D do sloshing num reservatório de pulverizador preenchido com 75% de sua capacidade configurado com o arranjo 2.	61
Figura 41 - Vistas em 2D do sloshing no reservatório do pulverizador com os arranjos 1 e 2: (a) instante = 1,2s e (b) instante = 3,1s.	62
Figura 42 - Gradiente de pressão na parede do reservatório (vistas lateral e frontal) para o arranjo 1 nas condições: (a) instante = 1,2s; (b) instante = 3,1s.	63

Figura 43 - Gradiente de pressão na parede do reservatório (vistas lateral e frontal) para o arranjo 2 nas condições: (a) instante = 1,2s; (b) instante = 3,1s.	64
Figura 44 - Posições dos pontos de pressão para as paredes dos defletores: (a) arranjo 1; (b) arranjo 2.	64
Figura 45 - Gradientes de pressão nas paredes dos defletores para os arranjos 1 e 2 nas condições: (a) instante = 1,2s; (b) instante = 3,1s.....	65
Figura 46 - Pressão no tempo na parede dos defletores do reservatório com nível 75%, nas seguintes condições: (a) arranjo 1; e (b) arranjo 2.	66
Figura 47 – Vista superior do reservatório com a indicação das posições dos planos de corte.	67
Figura 48 - Vistas dos perfis de velocidades nos planos de corte longitudinais nas configurações: (a) sem defletores; (b) arranjo 1; e (c) arranjo 2.	68
Figura 49 - Vistas dos perfis de velocidades nos planos de corte transversais nas configurações: (a) sem defletores; (b) arranjo 1; e (c) arranjo 2.	69
Figura 50 – Isosuperfícies com módulo de velocidade igual a 0,3m/s nas configurações: (a) sem defletores; (b) arranjo 1; e (c) arranjo 2.	70
Figura 51 - Representação vetorial dos perfis de velocidades da agitação mecânica nas configurações: (a) sem defletores; (b) arranjo 1; e (c) arranjo 2.	72
Figura 52 – Valores do Yplus na parede dos defletores, e nas paredes frontal e inferior do reservatório nas configurações: (a) sem defletores; (b) arranjo 1; e (c) arranjo 2.....	74
Figura 53 – Tensão de cisalhamento na parede inferior do reservatório nas seguintes condições: (a) sem defletores; (b) arranjo 1; e (c) arranjo 2.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	-	Análise da dependência de malha para os modelos transientes do reservatório sem defletores.....	50
Tabela 2	-	Análise da dependência de passo de tempo para os modelos transientes do reservatório sem defletores.....	51
Tabela 3	-	Valores de frequência natural do fluido em Hz, com três níveis de enchimento para os modos de 1 a 5.....	52
Tabela 4	-	Valores de pressão para o reservatório sem defletores.....	55
Tabela 5	-	Valores de pressão para o reservatório com os arranjos propostos.....	60

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O comportamento dinâmico de líquidos num reservatório sob a ação de uma excitação externa tem sido motivo de pesquisas em diversas áreas como sismologia, geofísica, engenharia nuclear, naval, civil, aeroespacial dentre outras. O fenômeno que representa a deformação da superfície livre de um fluido, que ocorre devido aos movimentos dele num recipiente delimitado pelas suas paredes, é comumente conhecido por *sloshing*. Um reservatório parcialmente cheio pode experimentar *sloshing* em várias circunstâncias, inclusive um fenômeno de ressonância, onde a superfície livre pode-se deformar de forma significativa, devido ao líquido se movimentar e chocar-se contra as paredes laterais, até mesmo atingindo a superfície superior do compartimento. Portanto, o projeto e a análise de caminhões-tanque e veículos fora-de-estrada com reservatórios de alta capacidade volumétrica exigem a consideração de cargas dinâmicas de *sloshing*, para reduzir os efeitos adversos no desempenho dinâmico direcional dos veículos, e na estabilidade dos reservatórios em movimento.

Para as máquinas agrícolas, esse efeito está presente tanto nos reservatórios de caldas de pesticidas para os implementos agrícolas acoplados em tratores como para as máquinas automotrizes, que também possuem reservatórios de combustível. A Figura 1 mostra alguns exemplos de pulverizadores automotrizes com reservatórios de capacidade de 3000 a 5000 litros.



Figura 1 – Exemplos de pulverizadores agrícolas automotrizes disponíveis no mercado
(Adaptado de Canal Rural, 2016).

Os principais efeitos indesejáveis do *sloshing* são o aumento dos carregamentos dinâmicos nas paredes dos reservatórios, danos por impacto, além de excitar as demais estruturas vizinhas influenciando até no conforto do operador. O comportamento das ondas de *sloshing* podem ser classificados em relação à altura de enchimento do reservatório, o tipo de impacto nas paredes e às frequências de excitação. Dependendo da proximidade da excitação à frequência de ressonância, ondas de deslocamento do fluido e saltos hidráulicos são formados com níveis baixos e médios de enchimento. Entretanto, para níveis mais altos de enchimento, uma grande resposta de onda estacionária é observada na faixa de frequência de ressonância. Godderidge (2006) indicou a classificação em três diferentes tipos de comportamentos de *sloshing* segundo à direção do movimento da fonte de excitação de um reservatório: *sloshing* lateral, gerados pelos movimentos de translação e angular (*pitch*) do reservatório; *sloshing* rotacional ou a formação de turbilhões, que é um fenômeno tridimensional que depende do formato do reservatório e da amplitude e frequência da excitação; e *sloshing* vertical, que pode causar ondas estacionárias e tendem a aumentar as cargas laterais sobre as paredes.

A movimentação do fluido no interior do reservatório pode provocar alguns efeitos indesejáveis como a formação de bolhas de ar, *flip-through*, salto hidráulico e impacto na parede superior do reservatório, conforme mostrado nas Fig. 2 e 3. Na Fig. 2a, é possível observar a formação de uma onda dentro do reservatório, onde o aumento da inclinação pode se aproximar à formação de um salto hidráulico (Fig. 3b), com uma frente de onda acentuada. O impacto resultante na parede é geralmente hidrodinâmico e não há formação de bolhas de ar. A formação de uma onda devido à frenagem de um veículo é representada na Fig. 2b, onde a interação dos fluidos líquido-gás é significativa. As pressões resultantes na bolha de gás podem causar amplificação dinâmica de tensões nas paredes com a interação fluido-estrutura. A formação de bolhas de ar nas ondas é mostrada nas Fig. 2c (região acinzentada), Fig. 3c e Fig. 3d. Quando ocorre o impacto de ondas desse tipo, as altas pressões de impacto podem resultar em erosões nas paredes, provocadas por cavitação nas regiões de impacto. E a formação do *flip-through* é representada nas Fig. 2d e Fig. 3a, onde a onda quebra antes de atingir a parede do reservatório e o fluido rapidamente sobe num formato de jato, podendo aumentar significativamente a aceleração do mesmo.

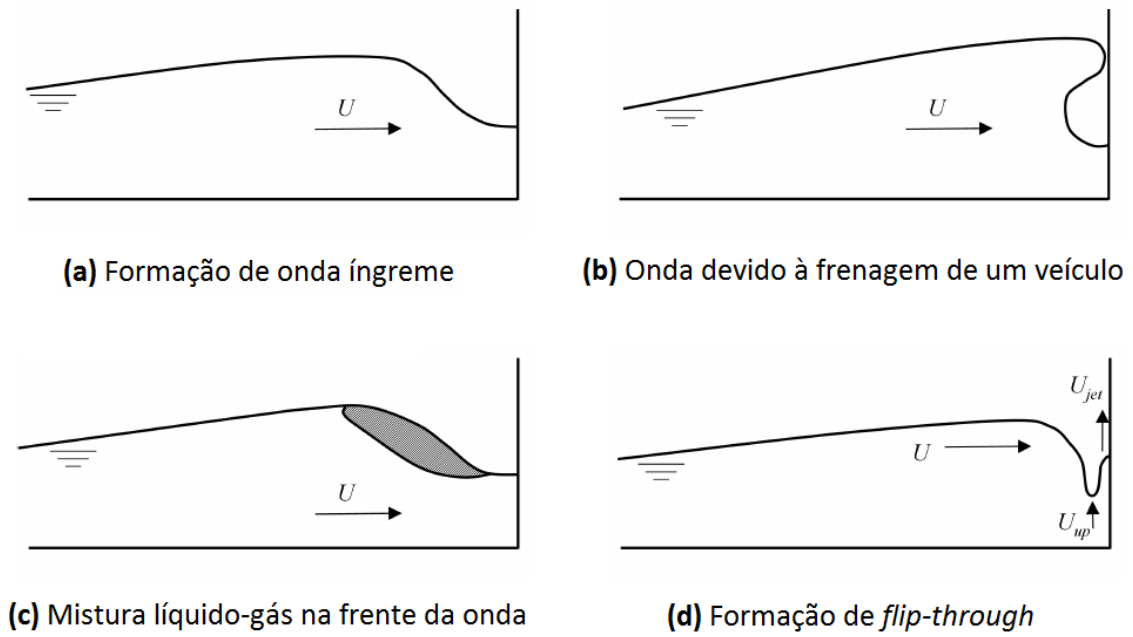


Figura 2 – Formações de ondas e efeitos do *sloshing* (Adaptado de GODDERIDGE, 2006).

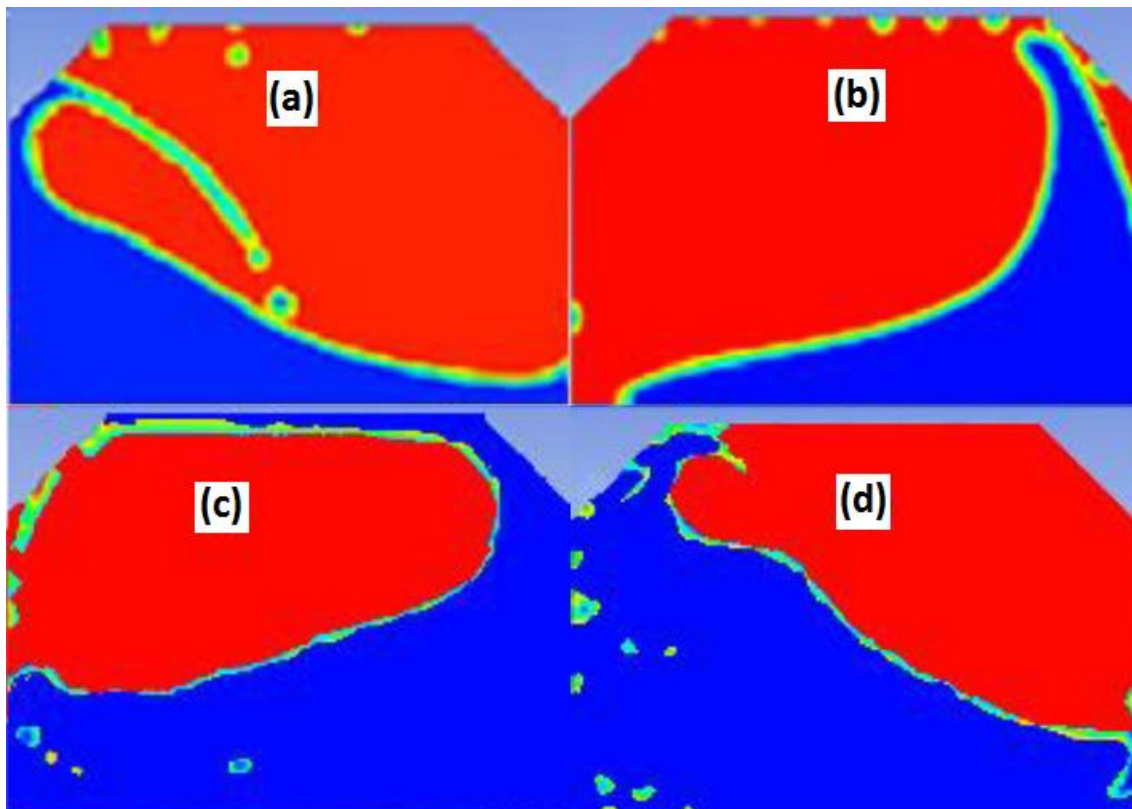


Figura 3 – Efeitos do *sloshing*: (a) *flip-through*; (b) salto hidráulico; (c) impacto na parede superior e formação de bolhas de ar; (d) efeito acumulativo de salto hidráulico, *flip through* e bolhas de ar (Adaptado de JOSHI et al., 2017).

Os navios que transportam líquidos, por exemplo, são suscetíveis a efeitos de *sloshing*, especialmente os petroleiros. O *sloshing* no navio é ocasionado pela excitação interna do fluido devida à variação periódica da posição do navio e alguns parâmetros do sistema oscilatório. Outro exemplo comum são os carregamentos através de caminhões rodoviários com reservatórios de fluidos como água, óleos e combustíveis.

Existem vários dispositivos e soluções de projeto que minimizam os efeitos do *sloshing* que podem ser adotados para os reservatórios. Uma das soluções é a utilização de defletores que dividem o reservatório em reservatórios menores deslocando a frequência natural de *sloshing* da faixa de frequência de excitações críticas. Porém, a quantidade de material necessária para tais estruturas é elevada, aumentando o peso e o custo dos mesmos. No caso dos reservatórios de calda de defensivos, a eficiência da homogeneização das caldas no interior do reservatório tem um grande impacto na qualidade da aplicação e no tratamento de uma cultura, podendo ser prejudicada pela introdução desses dispositivos. A subdosagem ou superdosagem de um determinado agroquímico no tratamento de uma cultura pode causar danos à mesma, tornando muito importante a homogeneização dessa solução.

Os custos e o tempo de desenvolvimento em projetos de reservatórios para máquinas agrícolas são altos, pois normalmente as empresas acabam investindo na construção de moldes para processos como rotomoldagem, RTM/RTMlight, sopro e injeção de plásticos. Tem-se o objetivo de não gerar novos custos com possíveis retrabalhos nas ferramentas devido a erros de projeto. Em alguns casos, as alterações necessárias para garantir a boa agitação do reservatório e minimizar os efeitos do *sloshing* podem ser inviáveis, e corresponder até a perda da ferramenta de fabricação, gerando custos ainda maiores.

Neste trabalho será avaliado o efeito de *sloshing* num reservatório de 4500 litros de um pulverizador agrícola para culturas não-perenes (como soja, milho e trigo) conforme representado no modelo 3D mostrado na Fig. 4.

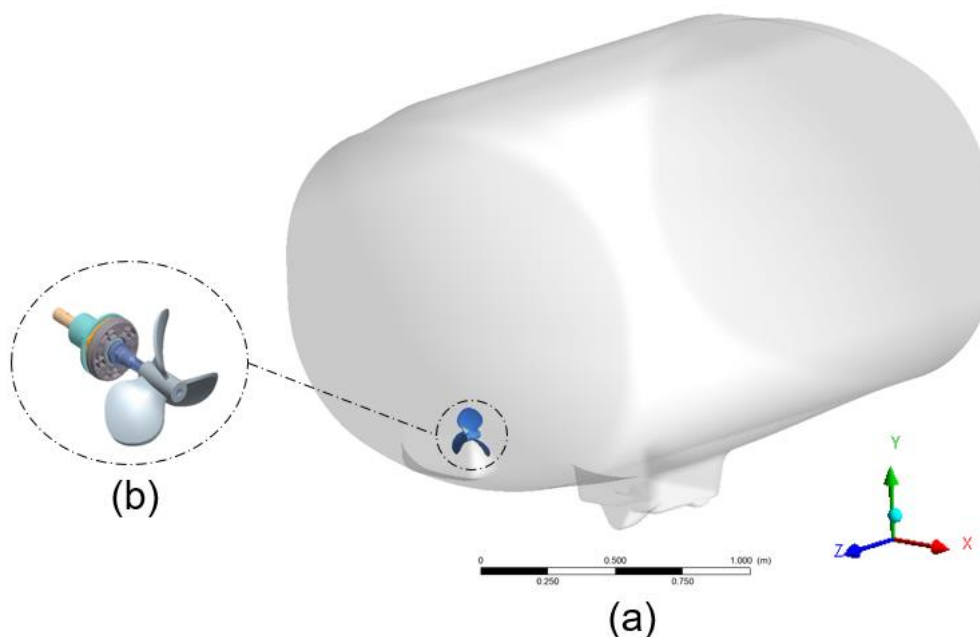


Figura 4 – (a) Modelo 3D do reservatório de 4500 litros com agitação mecânica; e (b) detalhe do agitador mecânico de hélice.

No intuito de reduzir os custos com protótipos dos reservatórios, pode-se utilizar a simulação numérica do *sloshing* e dos fenômenos envolvidos na agitação, sendo obtida com o auxílio de um código de fluidodinâmica computacional (CFD), que em uma análise tridimensional, utiliza a técnica de volumes finitos como método de discretização dos domínios fluidos.

A fluidodinâmica computacional envolve a solução das equações de conservação de massa, momento, transferência de calor e também de reações químicas (que neste estudo não foram utilizadas). O cálculo é feito em milhares de volumes de controle, determinando o domínio de fluxo computacional. Em cada volume de controle as variáveis são então linearizadas e resolvidas. Para a utilização de agitadores mecânicos (com hélice), por exemplo, a simulação pode ser feita dividindo-se o domínio em dois: um estático, representado pela voluta e outro rotativo, representando o agitador. Apesar deste tipo de simulação requerer alta capacidade computacional, pois exige o uso de uma interface entre os dois domínios, visto que as malhas geralmente não são coincidentes, há a vantagem de permitir diferentes refinamentos da malha para esses domínios. O domínio rotativo se caracteriza por apresentar, na metodologia de cálculo, a transformação de velocidades fazendo com que o domínio gire em relação às coordenadas de referência do sistema.

Nas últimas décadas, reconheceu-se que é importante levar em consideração a não linearidade das ondas de *sloshing*. Em termos da não linearidade da superfície livre, uma grande dificuldade é que as condições de contorno totalmente não-lineares tenham que ser satisfeitas na superfície livre desconhecida. Assim, as melhores opções para resolver o problema totalmente não-linear são os métodos numéricos.

Uma grande vantagem da técnica de CFD é a sua flexibilidade para mudar parâmetros de processo, regimes de fluxo, localização das geometrias quebra-ondas, localização dos agitadores e geometria dos reservatórios, sem a necessidade da execução de um protótipo em escala real. Hosain et al. (2018), por exemplo, investigaram numericamente os efeitos do *sloshing* em reservatórios de combustível para navios transportadores para entender o comportamento do fluido sob as estruturas, e validaram a abordagem de análise em escala reduzida baseada nas leis de similaridade.

1.1 Objetivos

O presente trabalho pretende estudar a simulação numérica aplicada ao problema de *sloshing* e a otimização de soluções que ao mesmo tempo minimizem seus efeitos e atendam aos critérios da agitação para reservatórios de máquinas agrícolas. As principais contribuições desta pesquisa são:

- A análise detalhada através da técnica de CFD de dois possíveis arranjos que podem ser instalados em reservatórios para reduzir os efeitos indesejáveis do *sloshing* na estabilidade dinâmica dos veículos sob movimentos repentinos como a frenagem brusca dos mesmos, e na integridade estrutural dos reservatórios;
- Preencher algumas lacunas da literatura que trata da investigação do *sloshing* em reservatórios onde também é necessária a agitação da mistura, como no caso dos pulverizadores agrícolas, não sendo possível a introdução de defletores no fundo deles;
- Investigar a viabilidade da simulação através do modelo multifásico homogêneo para avaliar os efeitos do *sloshing* e o comportamento das ondas e demais instabilidades não lineares envolvidas nesse fenômeno.

1.2 Organização do trabalho

O Capítulo 1 apresenta uma introdução do tema, as motivações e os objetivos deste trabalho.

No Capítulo 2, é apresentado um resumo dos trabalhos encontrados na literatura relacionados ao fenômeno de *sloshing* e sistemas de supressão dos efeitos do mesmo de modo analítico, computacional e/ou experimental.

O Capítulo 3 apresenta o equacionamento da solução numérica para a predição do comportamento do fluido no interior do reservatório, e as considerações para a solução das equações de Navier-Stokes com a condição de contorno de superfície livre, e o uso do modelo de turbulência adequado.

No Capítulo 4, são detalhados os modelos de simulação numérica utilizados neste estudo. É realizada a descrição do problema, e são apresentadas também todas as condições de contorno, critérios de convergência numérica e as ferramentas computacionais utilizadas.

No Capítulo 5, são apresentados os resultados e discussões para verificar a validade e aplicabilidade do método numérico escolhido, e evidenciar as vantagens e desvantagens dos arranjos propostos como solução de mitigação dos efeitos indesejáveis do *sloshing*.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões deste trabalho e propostas para novos estudos.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Essa revisão bibliográfica tem como objetivo mostrar o estado da arte referente ao assunto da utilização da técnica de CFD para a predição do comportamento do *sloshing* em reservatórios, revelando a tendência das pesquisas que foram e estão sendo desenvolvidas nesse contexto.

Técnicas de simulação numérica baseadas na solução de equações potenciais têm sido amplamente aplicadas para modelagem de *sloshing* de líquidos em reservatórios com defletores, e os resultados de estudos pertinentes serão discutidos brevemente neste trabalho.

Myrillas et al. (2017) estudaram o comportamento de *sloshing* em um reator nuclear com metais líquidos pesados através de uma comparação entre mercúrio e água em um reservatório cilíndrico sob excitações sísmicas. Foi notada a indução de forças adicionais nas paredes e nas estruturas internas do reservatório devido às oscilações do líquido dentro do mesmo. Um estudo de um modelo cilíndrico simplificado aplicando uma excitação senoidal foi realizado utilizando CFD e os resultados numéricos foram comparados com resultados experimentais, onde obteve-se uma boa correlação qualitativa. O efeito das propriedades do metal líquido no comportamento do *sloshing* foi demonstrado experimentalmente comparando o mercúrio e a água. A elevação máxima do líquido mostrou diferenças entre os dois líquidos, com os maiores valores para o mercúrio, onde foram observadas ejeções de gotículas e deslocamentos do líquido. O comportamento complexo do caso de ressonância foi bem capturado pelas simulações numéricas, incluindo as não linearidades do *sloshing* como a ejeção de gotículas, quebras de ondas, a formação de turbilhões e variações de baixa frequência da elevação de líquido no reservatório, conforme mostrado na Fig. 5.

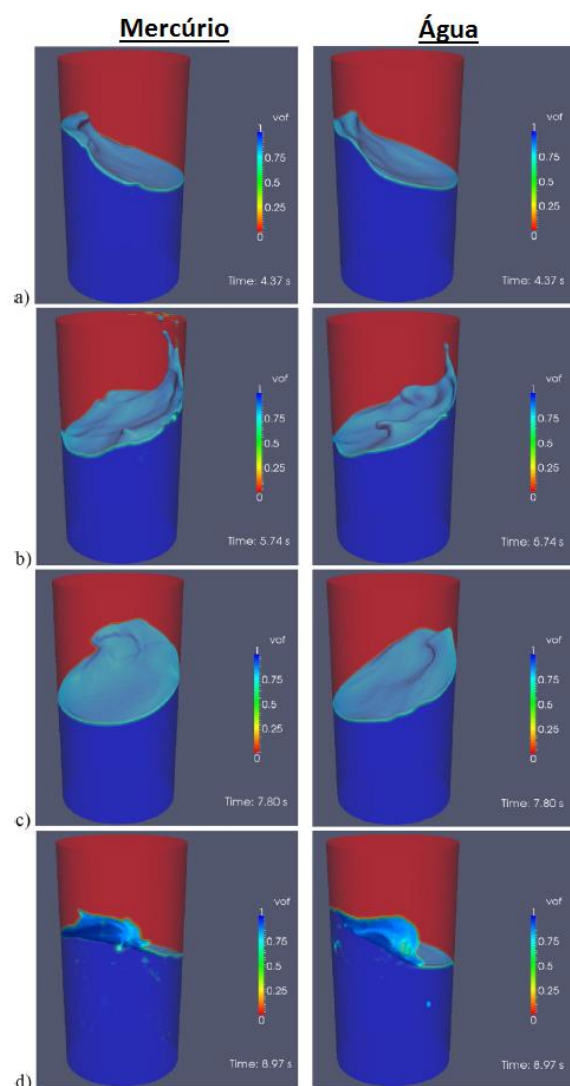


Figura 5 – Simulação de *sloshing* num caso de ressonância com mercúrio (à esquerda) e água (à direita): (a) *sloshing* não linear; (b) gotículas são ejetadas; (c) formação de turbilhões; (d) quebra de ondas (Adaptado de MYRILLAS et al., 2017).

A comparação quantitativa da máxima elevação do líquido também mostrou uma boa correlação com os experimentos na faixa de excitação estudada. Foi concluído que utilizar água para avaliar as forças de impacto e demais instabilidades no modelo do reator foi uma opção válida para frequências até o primeiro modo de frequência natural do *sloshing*, mas deve ser utilizado com ressalvas para altas frequências perto dos modos mais altos de ressonância.

Park et al. (2019) apresentaram um simples método analítico, nomeado teoria linear modificada, para a predição dos movimentos de *sloshing* de um líquido refrigerante sob algumas frequências de excitação em um reservatório de combustível irradiado de

um reator nuclear. Um reservatório de combustível irradiado (SFP) é um armazenamento temporário de combustível irradiado após a descarga do núcleo do reator, e possui a forma retangular. O fluido que se choca contra a parede do reservatório, ou se movimenta ao redor da mesma, foi estimado para altas e baixas frequências de excitação, como mostrado na Fig. 6.

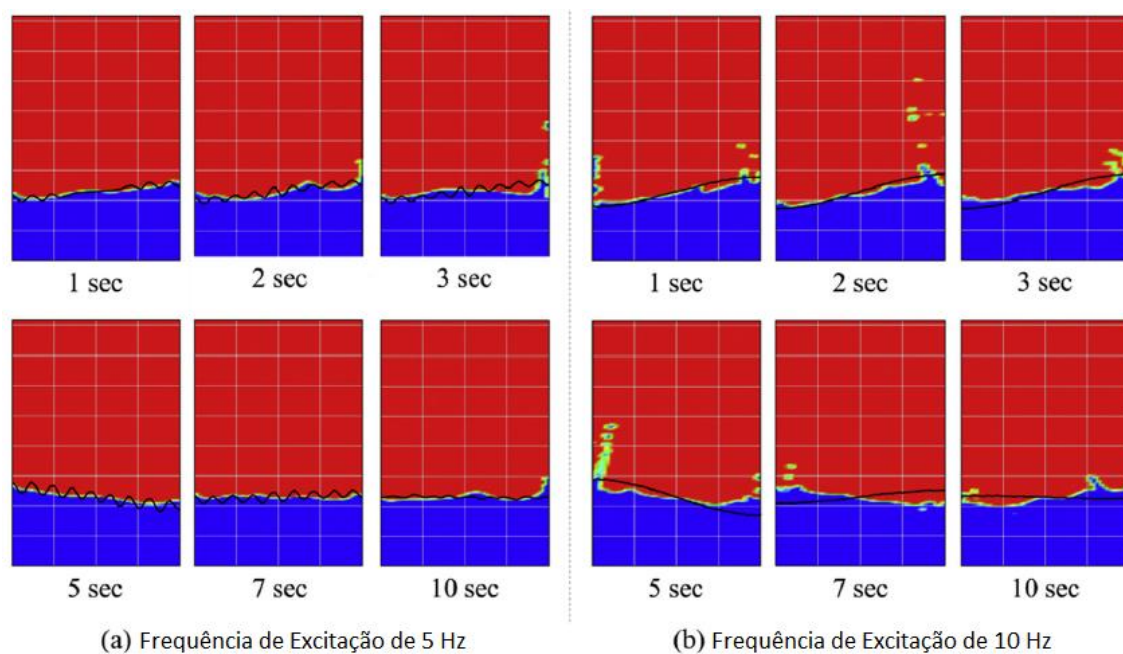


Figura 6 – Movimentos de *sloshing* do modelo com o nível 0,23m de enchimento para frequências de excitação de 5 Hz e 10 Hz (Adaptado de PARK et al., 2019).

A elevação do *sloshing* na teoria linear pode ser dividida em dois termos, um que corresponde à excitação externa impulsora do movimento, e o outro que corresponde à convecção do líquido, que depende principalmente da sua frequência natural. A amplitude do termo convectivo diminui com o aumento da frequência de excitação, enquanto que o termo de excitação externa aumenta, tornando a solução linear viável para o cálculo da elevação da superfície livre sob alta frequência de excitação. A teoria linear modificada foi adotada para prever o movimento do *sloshing* no qual o fluido passa a ser excitado no seu primeiro modo de frequência natural (caso de ressonância).

Foram realizadas análises teóricas e numéricas para comparação dos resultados tanto dos valores das alturas de elevação do *sloshing*, como da formação da superfície livre durante 10 segundos de simulação. A Figura 7 mostra as alturas de elevação das ondas de *sloshing* obtidas através da teoria linear, da teoria linear modificada e das

simulações numéricas em CFD. A altura de elevação das ondas que foi determinada pelas análises de CFD resultaram em valores muito maiores que através da teoria linear modificada. Essas diferenças nos resultados podem ser explicadas pela negligência de alguns parâmetros no método analítico, como a viscoelasticidade e a tensão de superfície, que são propriedades do fluido e não lineares.

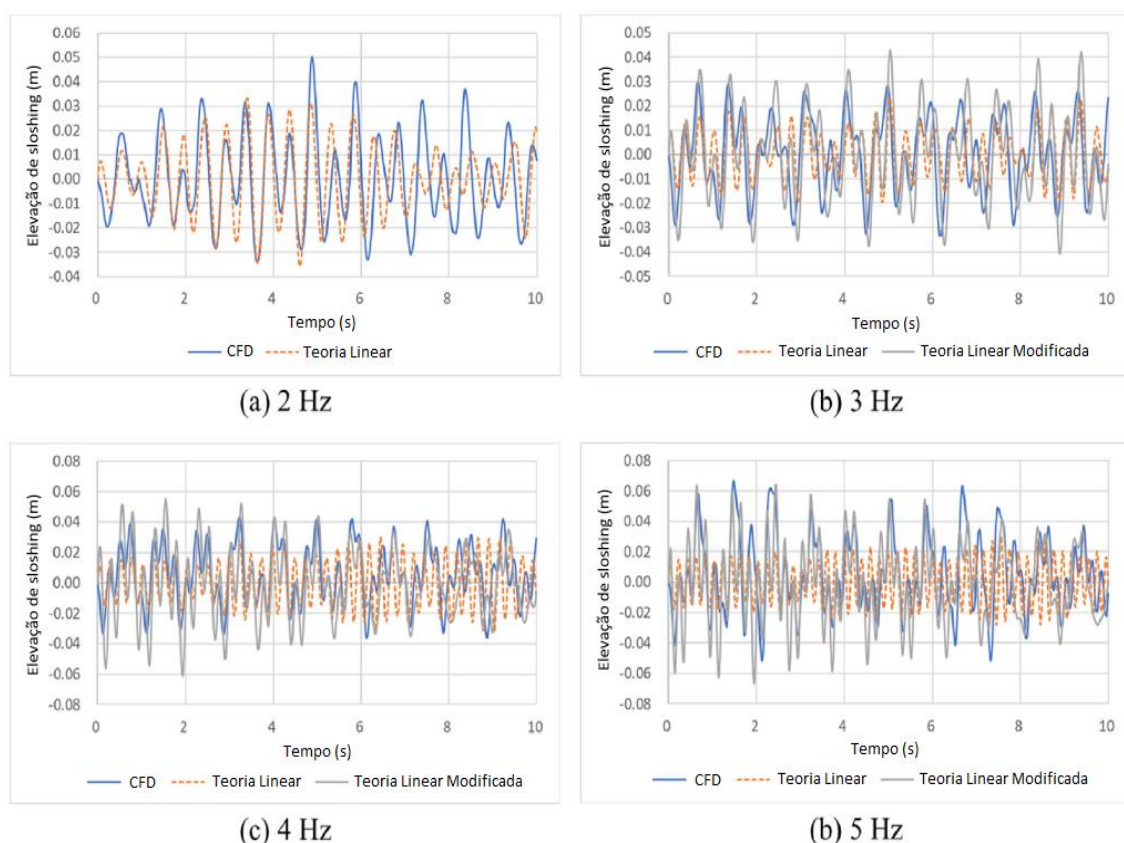


Figura 7 – Elevação de *sloshing* do modelo com o nível 0,23m de enchimento para frequências de excitação de 2 Hz, 3 Hz, 4 Hz e 5 Hz (Adaptado de PARK et al, 2019).

A importância do uso da técnica de CFD em relação aos métodos analíticos para aplicação em problemas envolvendo o fenômeno de *sloshing* também foi observada por Kolaei et al., 2014. Nesse trabalho foi investigado um modelo analítico de um reservatório de um veículo rodoviário parcialmente preenchido com diferentes seções transversais, usando a teoria linear para estimar as forças laterais transientes de impacto devido às ondas formadas dentro do mesmo. As forças e momentos causados pela movimentação do fluido nos instantes de manobras para esterçamento e frenagens do veículo são associadas à redução dos limites de estabilidade e performance de direção do mesmo. A

Figura 8 mostra um esquema do modelo de *roll* do veículo (movimento de rolagem lateral) verificado nesse estudo para a análise dinâmica do *sloshing* nos limites de estabilidade de um caminhão tanque.

A Figura 9 mostra as diferentes seções transversais avaliadas em relação à influência das mesmas nos resultados de carregamentos dinâmicos implicados ao veículo.

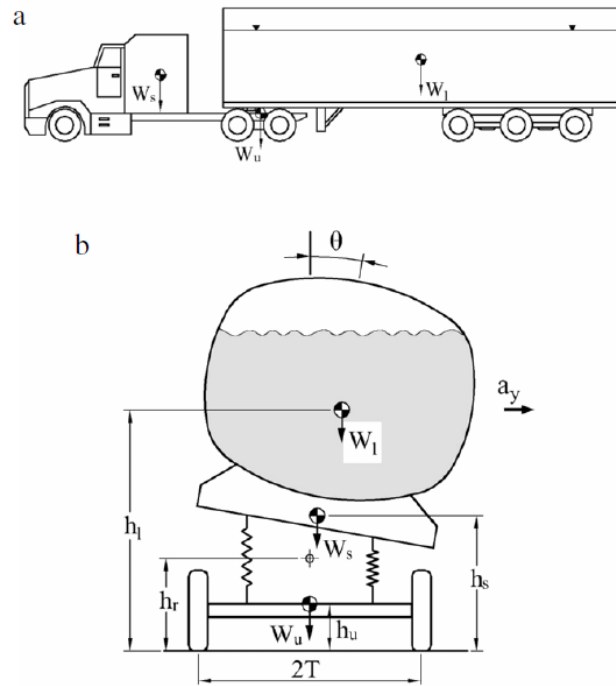


Figura 8 – (a) Esquema de um caminhão tanque de 6 eixos; (b) Modelo de *roll* de um tanque suspenso de um veículo rodoviário (KOLAEI et al., 2014).

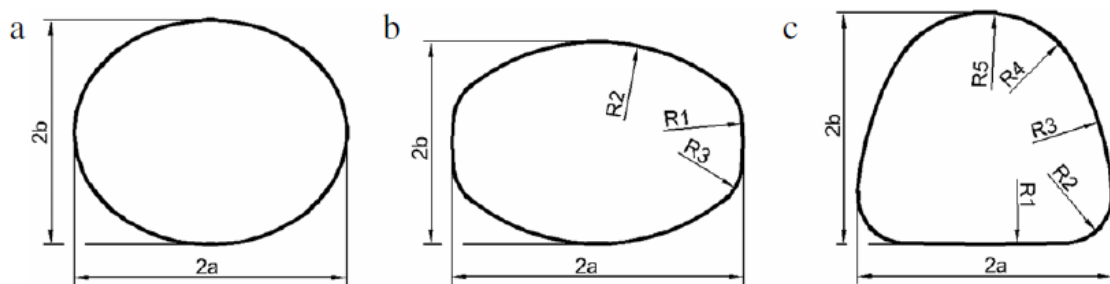


Figura 9 – (a) Geometria elíptica (ou circular quando $a = b$); (b) geometria oval modificada; e (c) triângulo de Reuleaux (KOLAEI et al., 2014).

De acordo com os autores deste trabalho, muitos estudos da dinâmica das ondas de *sloshing* em reservatórios parcialmente preenchidos utilizando códigos de CFD concluíram que os picos de forças e momentos são substancialmente maiores que aqueles estimados pelos modelos quase-estáticos lineares. Os resultados do modelo analítico proposto foram comparados com dados experimentais e de CFD de outros estudos referenciados, sendo satisfatórios exceto com frequências de excitação próximas às condições de ressonância. Com relação à seção transversal do reservatório, os resultados apresentaram maior eficiência na supressão dos efeitos de *sloshing* para o formato de triângulo de *Reuleaux*, sob níveis intermediários de enchimento.

Nicolsen et al. (2017) também investigaram numericamente o comportamento dinâmico do modelo de um reservatório de um caminhão em diferentes cenários de movimentos: o de frenagem do veículo em uma linha reta, com forças longitudinais de *sloshing* exercidas sob as paredes do reservatório; o veículo num movimento brusco de desvio de obstáculo (*lane change*), com alternância de forças laterais de *sloshing* em cada lado do reservatório; e o veículo realizando uma manobra em curva, com carga lateral de *sloshing* constante em um lado do reservatório. A Figura 10 mostra os cenários de frenagem e de *lane change* do modelo analisado do caminhão.

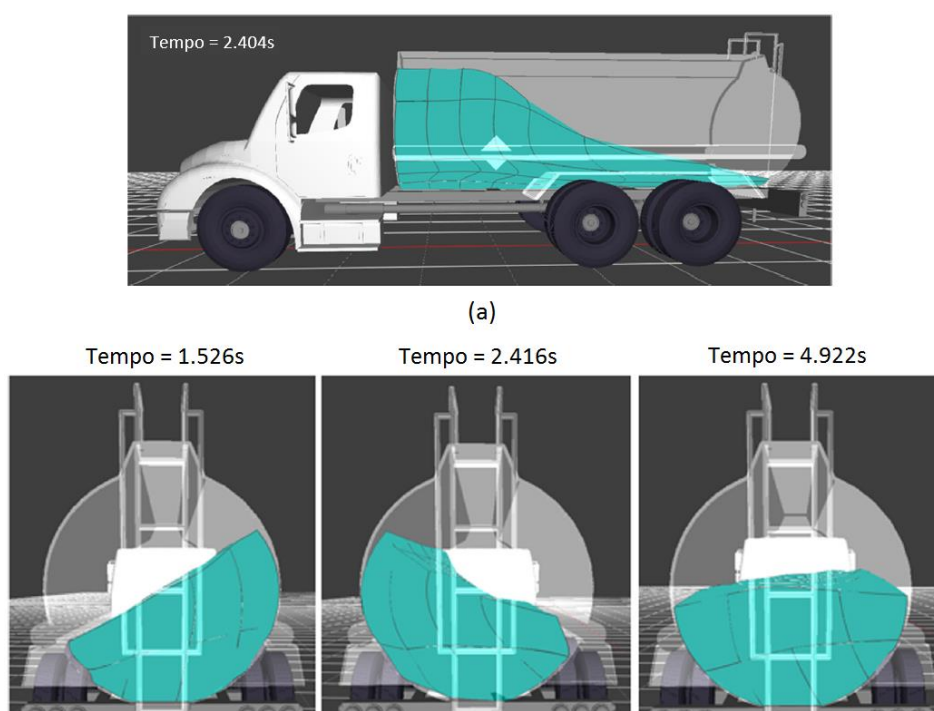


Figura 10 – (a) *Sloshing* longitudinal devido à frenagem do veículo; (b) *sloshing* lateral devido ao *lane change* para alguns instantes de simulação (Adaptado de NICOLSEN et al., 2017).

O objetivo principal do estudo foi desenvolver um modelo de *sloshing* em elementos finitos do tipo ANCF (*Absolute Nodal Coordinate Formulation*) integrado com um algoritmo de um sistema multicorpos (MBS) para o estudo desses cenários complexos. Os elementos ANCF foram usados nesta investigação para descrever geometrias de malha complexas, capturar a mudança de inércia devido à mudança no formato do fluido dentro do reservatório, e calcular com precisão as forças centrífugas que, para corpos flexíveis, não assumem a forma simples usada na dinâmica de corpo rígido. Essa abordagem propôs analisar a distribuição de inércia e viscosidade do fluido, e visualizar a mudança da superfície livre, ao contrário de outros modelos de inércia discreta que não capturam esses detalhes significativos.

Os resultados demonstraram que dependendo do cenário, o fenômeno de *sloshing* pode aumentar as forças de contato com o solo de algumas rodas do veículo, enquanto ocorre a redução dessas forças em outras rodas, e isso pode levar à instabilidade do veículo por aumentar a possibilidade das rodas perderem o contato com o solo e causar algum acidente.

Iranmanesh e Passandideh-Fard (2017) realizaram um estudo de viabilidade, através de modelos numéricos, do uso de um cilindro submerso dentro de um reservatório como um dispositivo para absorver a energia cinética das ondas de *sloshing* sob diferentes condições de excitação. Foram considerados dois cenários com aceleração constante (CA) e um com excitação oscilatória (SOE). Para validar os modelos numéricos, os resultados foram comparados com resultados experimentais e numéricos disponíveis na literatura. Para confirmar a eficiência do uso do cilindro submerso para diminuir os efeitos do *sloshing*, a amplitude e a frequência da excitação, o nível de enchimento do reservatório, o diâmetro do cilindro, a densidade, e a posição do mesmo foram variados e analisados separadamente.

A Figura 11 mostra as vistas laterais do reservatório com o *sloshing* devido a um caso de excitação senoidal com os resultados comparativos entre o comportamento experimental das ondas, os resultados numéricos da solução sem o cilindro proposto, e da solução com o cilindro. Sobre as variáveis analisadas, concluiu-se que a supressão da taxa de energia cinética de *sloshing* foi maior quando o reservatório foi excitado com a frequência natural de *sloshing*, e quando o comprimento do cilindro na direção x aumentou. Já quando a densidade do cilindro foi igual ou menor que a densidade da água,

não houve alterações significativas nos valores da energia cinética das ondas no reservatório.

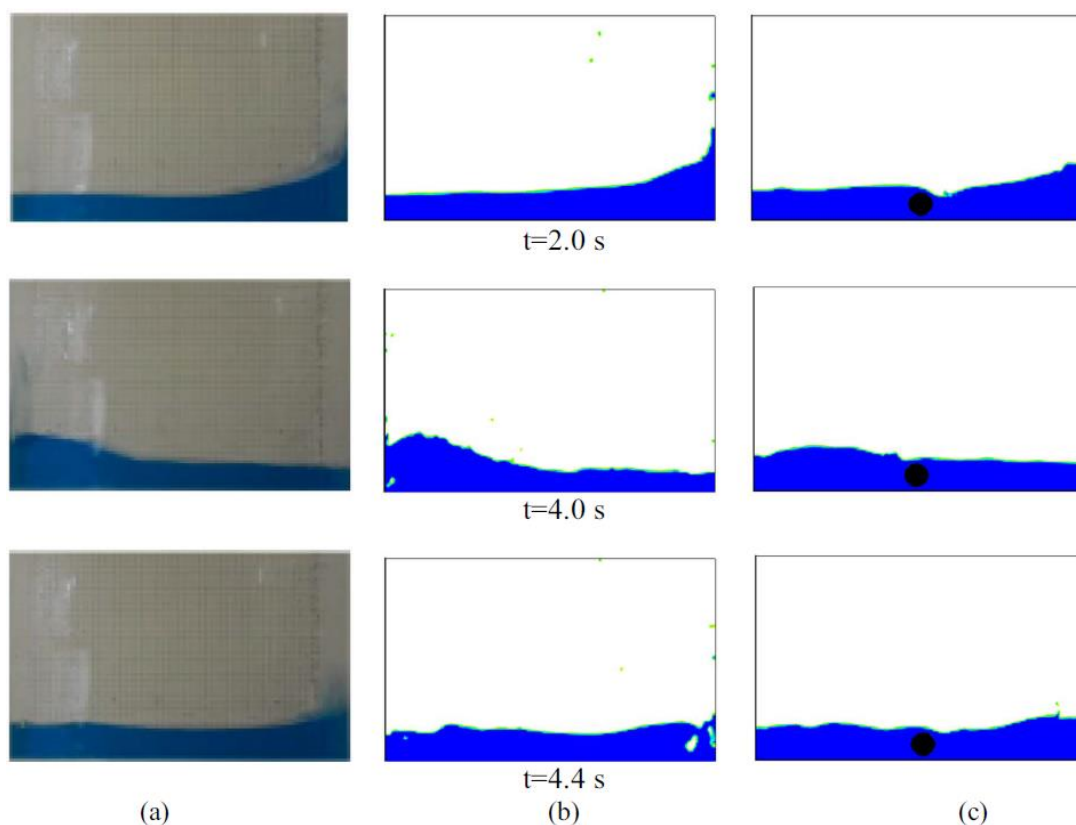


Figura 11 – *Sloshing* de um reservatório em movimento sob excitação externa oscilatória: (a) resultados experimentais; (b) sem o cilindro; e (c) com o cilindro (Adaptado de IRANMANESH e PASSANDIDEH-FARD, 2017)

Celis et al. (2017) analisaram os fenômenos hidrodinâmicos de *dam breaking* e *sloshing* na avaliação da progressiva inundação de navios e plataformas offshore. O movimento de um fluido no espaço de uma embarcação durante a inundação é violento e complexo. Nesse sentido, foi estudado o comportamento dos fluxos de líquido e ar confinados em um reservatório parcialmente cheio, que através da abertura de uma passagem preenche um outro reservatório, com o intuito de causar o desequilíbrio necessário para que ocorra a inundação da embarcação.

O efeito de defletores como dispositivos *anti-sloshing* em oscilações de líquido depende da posição de instalação dos mesmos, que tem resultados distintos nas frequências de *sloshing* e dos campos de pressão hidrodinâmicos associados. Por isso, o fenômeno deve ser investigado seguindo a metodologia baseada na conservação da fração volumétrica para representar a superfície livre. Dois casos de *dam breaking* foram

validados, considerando diferentes condições de transferência da massa de água através de duas configurações de aberturas, uma no fundo e outra 30 mm acima, conforme indicado na Fig. 12. Os resultados dos modelos tiveram boa correlação com os resultados experimentais.

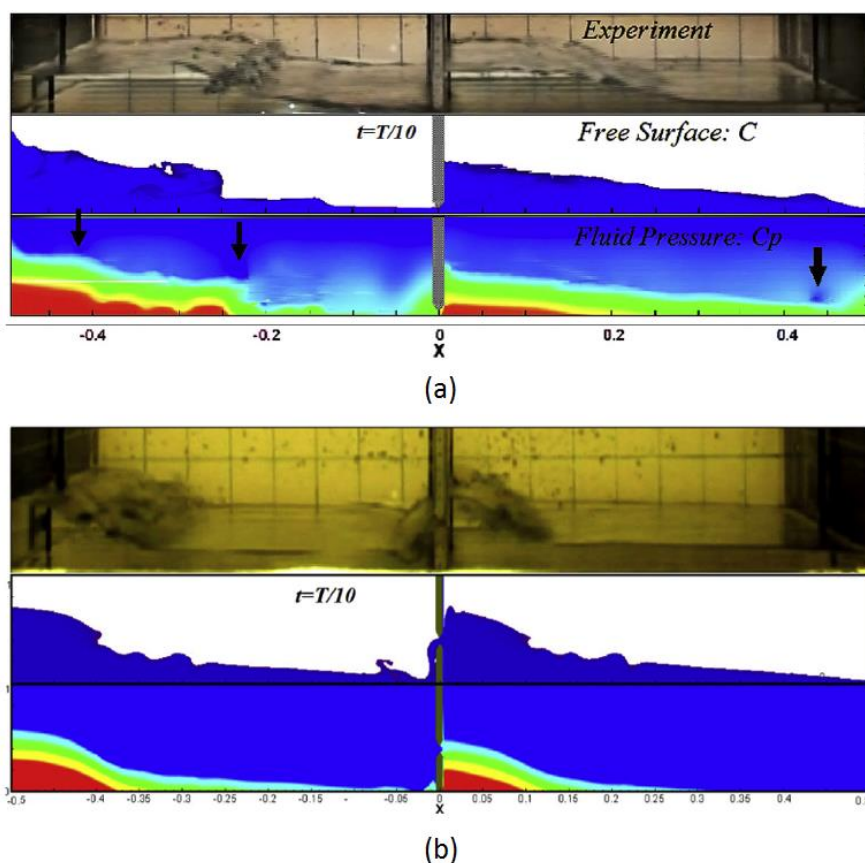


Figura 12 – Comportamento da superfície livre e do campo de pressão nas condições: (a) abertura no fundo do reservatório; e (b) abertura 30 mm acima (Adaptado de CELIS et. al, 2017).

Wang et al. (2017) estudaram o efeito de vários defletores nas oscilações de um líquido em reservatórios toroidais no intuito de evitar falhas estruturais devido a comportamentos hidrodinâmicos indesejáveis. As influências de vários parâmetros como nível de enchimento do reservatório, o arranjo de defletores e o comprimento desses defletores no interior do mesmo, além dos resultados em termos de frequências, forças de impacto e formato das ondas de *sloshing*, foram apresentados neste estudo. Os resultados mostraram que o método numérico utilizado permitiu a simulação de fenômenos complexos de *sloshing* usando um número relativamente pequeno de graus de liberdade, enquanto a malha consistiu apenas em elementos bidimensionais.

Outro estudo numérico recente sobre defletores instaladas no interior de reservatórios foi apresentado por Qin et al. (2019). O objetivo deste trabalho foi avaliar a resposta estrutural de diferentes configurações de defletores verticais e horizontais num reservatório com *sloshing* considerando a teoria de hidroelasticidade. Foi feita a comparação do uso de defletores rígidos e elásticos conforme mostrado na Fig. 13. Os resultados indicaram que a ressonância estrutural no defletor elástico não afetou apenas a força total no próprio defletor, mas também amplificou a força total na parede do reservatório. Quando a ressonância estrutural ocorreu na frequência principal de excitação, a resposta do defletor maior influenciou fortemente a pressão do líquido em uma área grande, levando ao aumento da força na parede do reservatório.

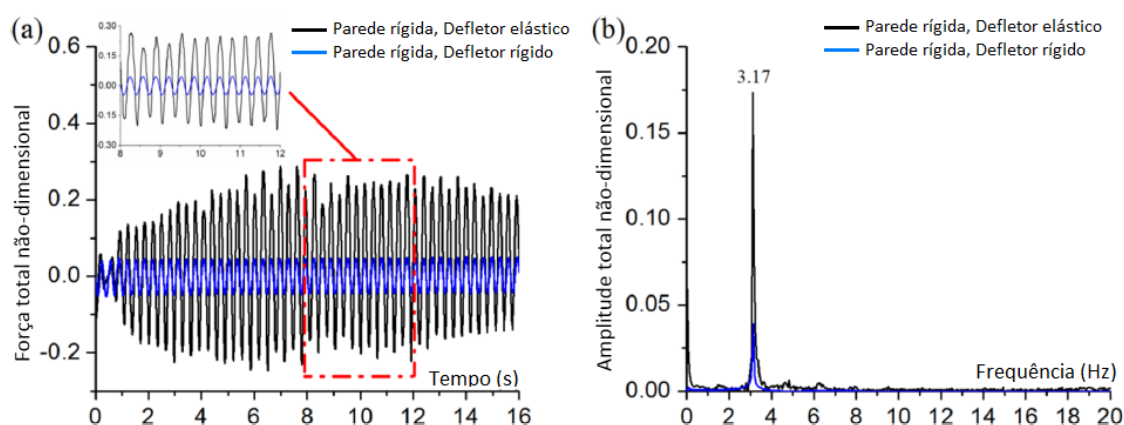


Figura 13 – (a) Comparação da força de *sloshing* na parede rígida do reservatório considerando os defletores horizontais elásticos e rígidos; e (b) FFT correspondente no caso de ressonância estrutural (Adaptado de QIN et. al, 2019).

Bellezi et al. (2019) investigaram de forma abrangente o *sloshing* em reservatórios, para a indústria naval e de *offshore*, em forma de caixa, equipados com defletores perfurados. O estudo considerou uma grande variedade de parâmetros, os quais incluíram diversas áreas de abertura nos defletores e diferentes níveis de enchimento sobre frequências de excitação abrangendo os três primeiros modos de ressonância de *sloshing* do reservatório sem defletores. As simulações numéricas foram realizadas adotando-se um método baseado em partícula totalmente Lagrangiana, que lida facilmente com fenômenos que envolvem condições de superfície livre não linear, como grandes deformações e fragmentação de superfícies, além de geometrias complexas.

A eficácia da relação da razão de área aberta otimizada em função da razão de enchimento dos reservatórios foi confirmada por simulações numéricas usando as geometrias dos defletores propostos, conforme mostrado na Fig. 14.

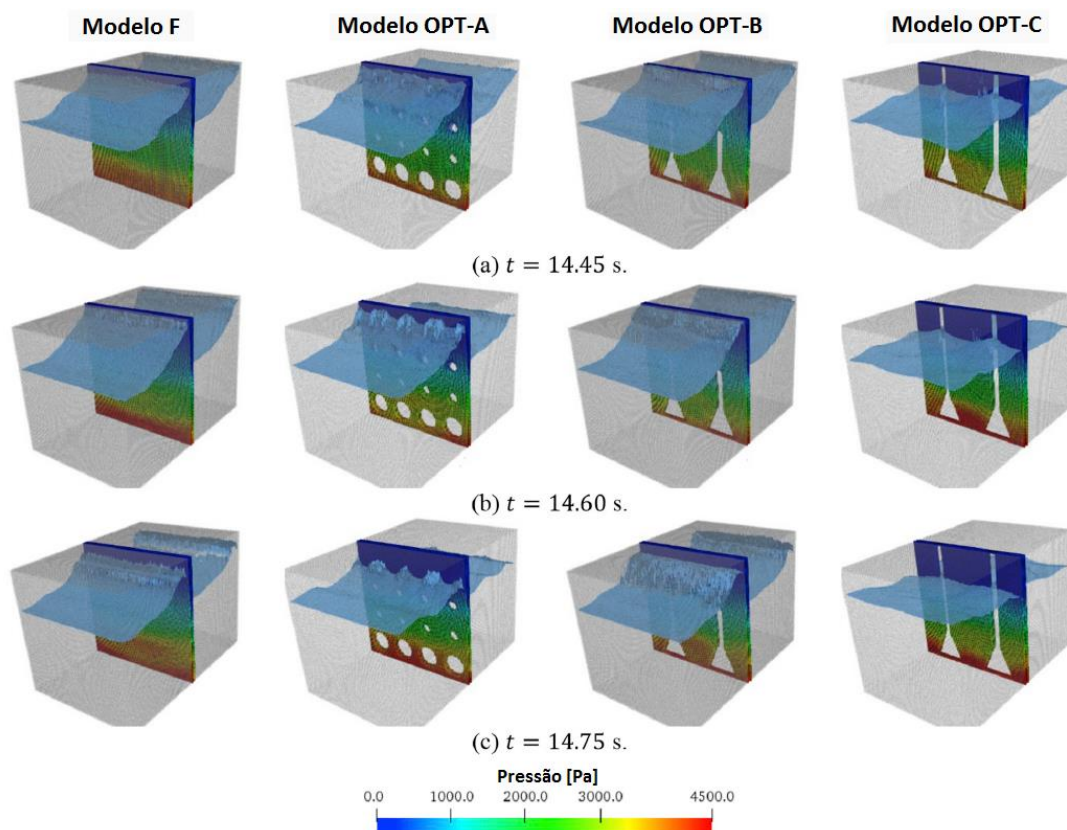


Figura 14 – Vistas em 3D do *sloshing* em três diferentes instantes para os modelos com defletores perfurados com otimizações da área de abertura (Adaptado de BELLEZI et. al, 2019).

Zhang et al. (2019) também investigaram um dispositivo *anti-sloshing* utilizando esferas plásticas flutuantes sobre o fluido num reservatório retangular. Uma solução analítica baseada em fluxo potencial foi resolvida para ajudar a explicar as observações experimentais, e com uma escolha apropriada do coeficiente de amortecimento obteve-se boa correlação analítico-experimental. Aumentando o número de camadas de esferas (o que seria como aumentar a densidade das esferas) permitiu reduzir a primeira frequência natural de *sloshing* para o reservatório. Foram realizadas comparações entre os resultados analíticos e experimentais, sendo discutido os efeitos de várias camadas de esferas em relação ao formato das ondas e a pressão dinâmica nas paredes do reservatório com três níveis diferentes de enchimento.

Os resultados mostraram que mesmo com apenas uma única camada de esferas flutuantes foi possível reduzir as forças de *sloshing* devido à dissipação de energia, e a amplitude da pressão dinâmica também foi reduzida à medida que foram adicionadas novas camadas de esferas. A Figura 15 mostra os diferentes arranjos de camadas de esferas plásticas flutuantes e o comportamento dos movimentos do fluido no reservatório.

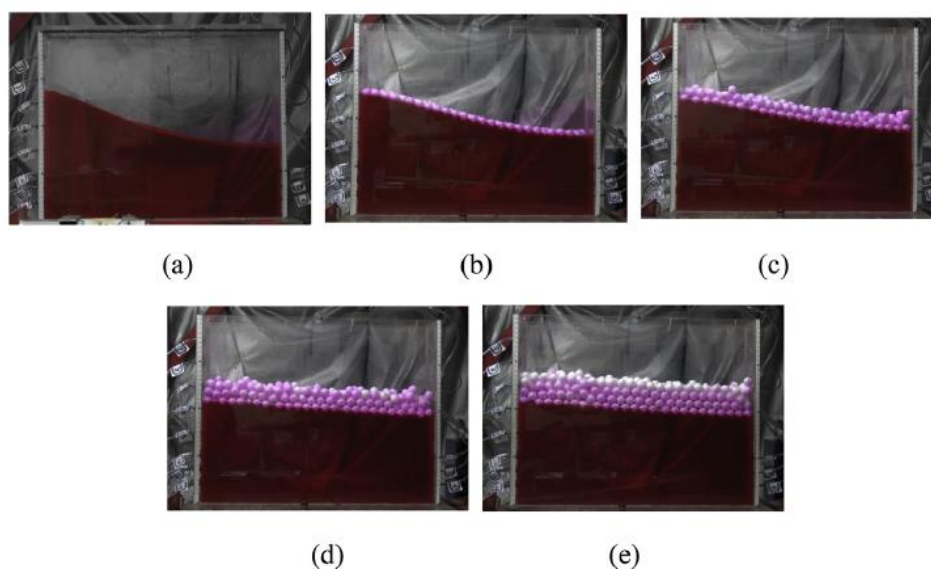


Figura 15 – *Sloshing* com diferentes camadas flutuantes de esferas plásticas nas condições: (a) sem camadas; (b) 1 camada; (c) 2 camadas; (d) 3 camadas; e (e) 4 camadas (ZHANG et. al, 2019).

Micheli et al. (2015) concluíram que no caso dos reservatórios de caldas de defensivos agrícolas de um pulverizador, a eficiência da homogeneização da calda dentro dos mesmos tem grande impacto na qualidade da aplicação e no tratamento de uma cultura.

O objetivo deste estudo foi avaliar a viabilidade da utilização de um modelo em CFD aplicado ao problema de agitação. Deste modo, resultados numéricos foram comparados a testes experimentais normalizados. Utilizando um modelo monofásico (água), avaliaram-se os perfis de tensões de cisalhamento na parede do reservatório a fim de correlacionar essa variável com a concentração de resíduos. A Figura 16 mostra uma análise comparativa numérico-experimental da parede inferior do reservatório com regiões de acúmulo de resíduos.

A comparação entre resultados experimentais e o modelo computacional desenvolvido, indicou que regiões com baixos valores numéricos de tensão de

cisalhamento estavam em concordância com as regiões de alta deposição de soluto das caldas. A partir dessas análises, torna-se importante verificar se agitação pode ser prejudicada pela introdução de dispositivos *anti-sloshing*, como o caso dos defletores.

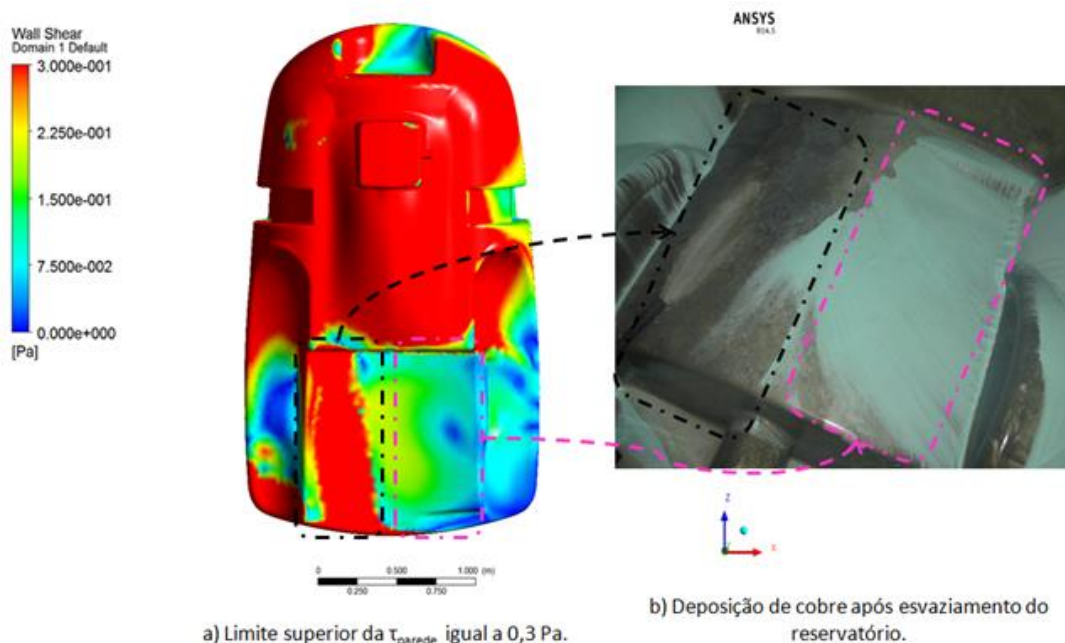


Figura 16 – Comparação numérico-experimental entre o perfil de tensão de cisalhamento e as regiões de acúmulo de resíduos na parte plana da parede inferior do reservatório (MICHELI et. al, 2015).

Por outro lado, Pukkella et al. (2019) e Gu et al. (2019) estudaram numérico-experimentalmente a agitação em reservatórios de mistura para processos industriais. Neste tipo de reservatório, a eficiência da agitação é tipicamente aumentada através de diferentes sistemas de defletores e rotores. Ambos os resultados mostraram, sob diferentes condições de enchimento do reservatório, que os sistemas de defletores adotados aliados aos formatos dos rotores promoveram características de mistura bastante interessantes. No primeiro estudo, as partículas experimentaram movimentos muito maiores como evidenciado nas trajetórias das partículas mostradas na parte inferior da Fig. 17. No segundo estudo, pode ser observado na Fig. 18 que a altura da nuvem de partículas sólidas suspensas do reservatório com sistema de rotor fractal foi maior que os demais modelos simulados.

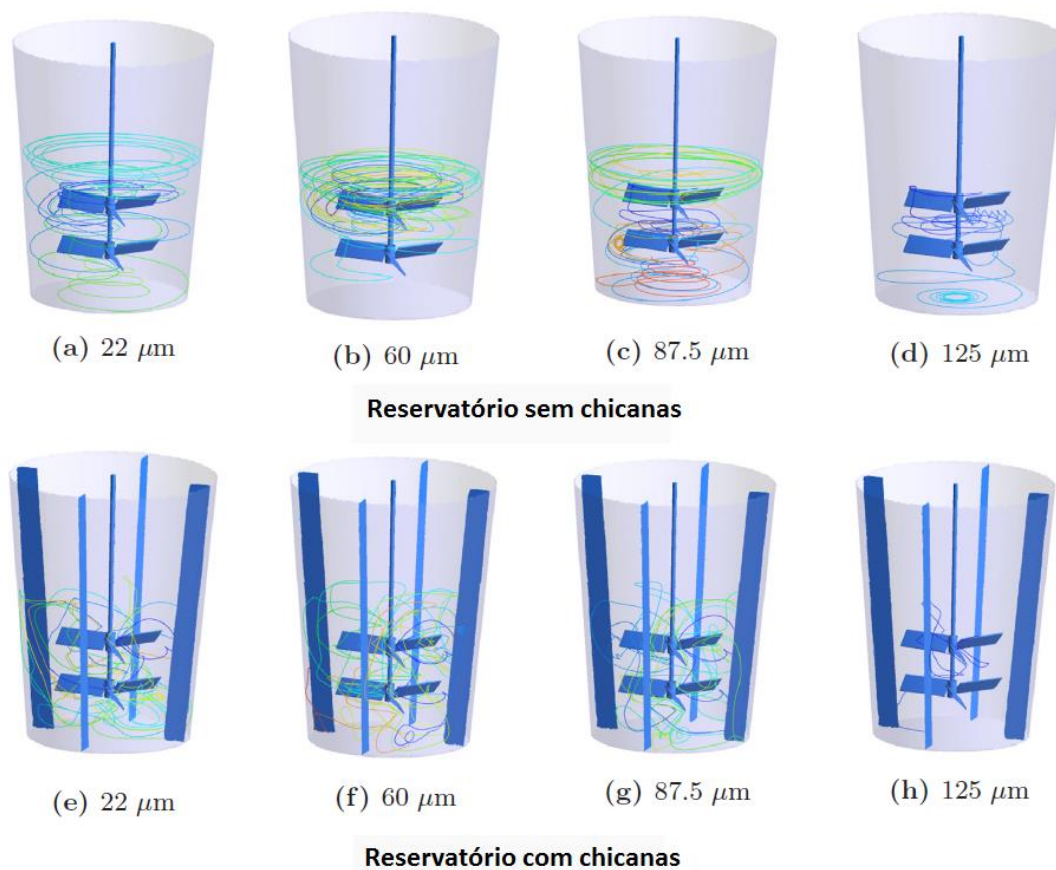


Figura 17 – Estimativa das trajetórias das partículas para quatro classes de diferentes para o reservatório sem e com defletores (Adaptado de PUKKELLA et. al, 2019).

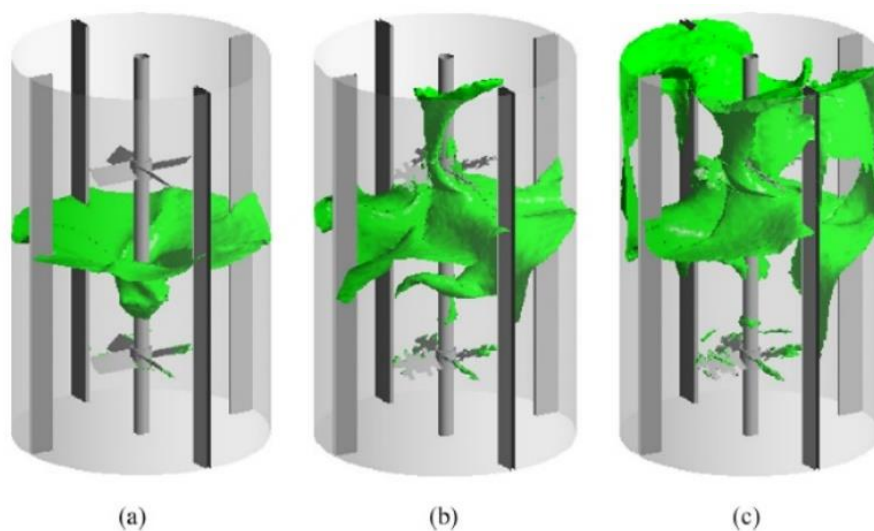


Figura 18 – Representação da nuvem de partículas sólidas: (a) rotor de 4 pás simples; (b) arranjo 1 com pás fractais; e (c) arranjo 2 com pás fractais (GU et. al, 2019).

Estudos mais recentes como os apresentados por Guan et. al (2020) e Shih et. al (2021), abordaram diferentes métodos numéricos para a predição de soluções para a mitigação dos efeitos não lineares do *sloshing* em reservatórios através do uso de defletores posicionados no fundo e nas paredes laterais deles. No primeiro estudo, foi realizada uma simulação numérica em reservatórios tridimensionais retangulares com excitações externas horizontais e movimentos de *roll*, utilizando o método de elementos de contorno (*Boundary Element Method*). No segundo estudo, foi utilizado o método de múltipla escala de Trefftz (*Multiple-scale Trefftz Method*) numa análise bidimensional de reservatórios retangulares e trapezoidais, com o intuito de reduzir o problema de pequenas escalas geométricas e encontrar uma relação linear entre o fator de dissipação e os passos de tempo das simulações. Ambos os estudos apresentaram resultados mais efetivos para a redução das amplitudes das forças e momentos nas paredes dos reservatórios quando utilizados defletores verticais para as excitações horizontais.

Através dos estudos apresentados nessa revisão bibliográfica, foi possível contextualizar o fenômeno de *sloshing* em reservatórios parcialmente preenchidos de veículos em movimento, e como seus efeitos podem impactar na integridade estrutural desses reservatórios e no comportamento dinâmico do veículo quando submetido à repentina aceleração ou abrupta desaceleração. Porém, torna-se necessária a investigação de dispositivos para a mitigação do *sloshing* que não sejam montados no fundo dos reservatórios e não prejudiquem a agitação de calda dentro deles, que é um requisito para o projeto de reservatórios para pulverizadores agrícolas. Esse trabalho irá permitir preencher essa lacuna presente na literatura sobre o problema abordado.

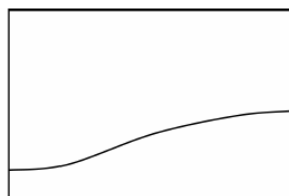
CAPÍTULO 3

MODELAGEM MATEMÁTICA

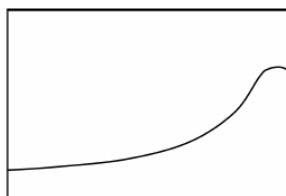
3.1 Caracterização do fenômeno de *sloshing*

3.1.1 Classificação das ondas segundo à resposta ao movimento

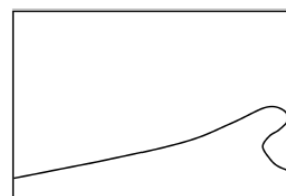
A classificação das ondas de *sloshing* depende da natureza do impacto e do efeito das mesmas sobre as paredes do reservatório, e tem grande influência no dimensionamento estrutural. Quando a superfície livre permanece plana, o *sloshing* pode ser descrito por uma equação linearizada, e o comportamento das ondas é conforme mostrado na Fig. 19a. Quando a amplitude do movimento aumenta ou a frequência de excitação fica próxima à ressonância, a resposta do *sloshing* é classificada como de baixa não linearidade, onde o fluido experimenta movimentos não-lineares como o rotacional, por exemplo (Fig. 19b). Já na Fig. 19c, ocorrem mudanças quase instantâneas na velocidade do fluido e há a formação de ondas de deslocamento. Outros aspectos do escoamento, como o turbilhonamento de ondas e aprisionamento de ar, complicam sua descrição com um modelo matemático analítico, e torna-se necessário o uso de modelos ou abordagens numéricas.



(a) Onda de *sloshing* linear, que pode ser modelada pela teoria linear potencial



(b) Onda de *sloshing* de baixa não-linearidade, que requer métodos analíticos de maior ordem



(c) Onda de *sloshing* de alta não-linearidade, com impactos e mudanças bruscas de velocidade do escoamento

Figura 19 – Classificação das ondas de *sloshing* (Adaptado de GODDERIDGE, 2006).

3.1.2 Teoria linear e frequência natural

Faltinsen (1978) estabeleceu uma simples solução analítica, nomeada teoria linear de *sloshing*, com base na teoria potencial de ondas para prever o movimento de dispersão de um líquido em um reservatório parcialmente cheio.

A teoria linear foi desenvolvida para problemas bidimensionais num reservatório retangular excitado horizontalmente com um movimento causado por uma onda senoidal, conforme mostrado na Fig. 20. Neste cenário, supõe-se que o líquido seja invíscido e o escoamento não rotacional (PARK et al., 2019; LOPEZ, 2020).

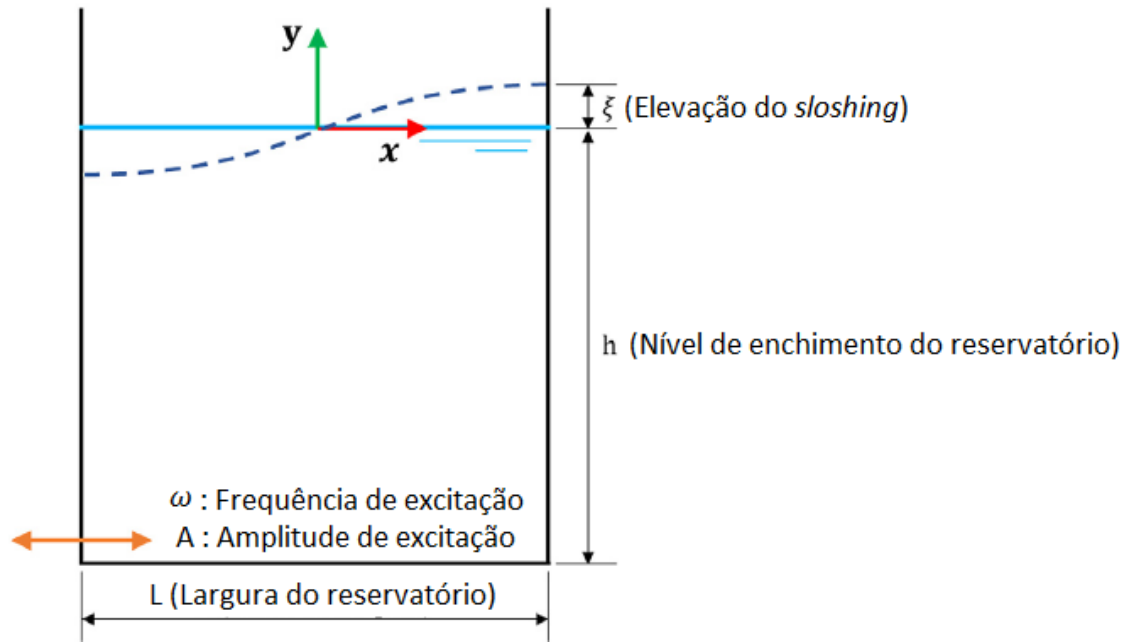


Figura 20 – Diagrama esquemático do fluido num reservatório retangular (Adaptado de PARK et al., 2019).

A frequência natural do fluido ω_n em um reservatório retangular para n modos de ressonância de *sloshing* pode ser calculada através da Eq. (1):

$$\omega_n = \sqrt{\frac{n\pi g}{L} \cdot \tanh\left(\frac{n\pi h}{L}\right)} \quad (1)$$

onde, n é o índice do modo de frequência natural (*wavenumber*); g é a aceleração da gravidade; L é a largura do reservatório; h é o nível de enchimento do reservatório.

A análise modal indica que altos modos de frequência natural podem influenciar a resposta do *sloshing*, sendo diretamente proporcional à aceleração imposta ao reservatório (FALTINSEN et al., 2005).

A frequência de excitação aplicada ao reservatório neste trabalho é descrita no Capítulo 4. A análise da frequência natural através de uma simplificação da geometria do reservatório estudado é adotada como uma das verificações dos modelos de simulação numérica neste trabalho. Pode ser identificado se a excitação do reservatório trouxe as condições de ressonância ao movimento de *sloshing* do fluido dentro do mesmo, e consequentemente altos níveis de impacto das ondas formadas. É realizada uma análise no domínio da frequência das amplitudes de alguma variável de saída (resposta do sistema) em relação à frequência de excitação. E após isso, são comparados os resultados com os modos de frequência natural do fluido calculados através da teoria linear, conforme mostrada no Capítulo 5.

3.2 Equacionamento da solução numérica

O modelo matemático utilizado na simulação computacional apresentada no capítulo 4 é baseado na equação de conservação da massa e nas equações de transporte de Navier-Stokes, que descrevem os fenômenos de transporte da quantidade de movimento, energia e massa. As equações de Navier-Stokes incluem a viscosidade de um fluido usualmente newtoniano, e fornece a representação mais fiel do verdadeiro comportamento do fluido. A solução analítica dessas equações diferenciais parciais torna-se inviável comparada à agilidade da solução numérica.

Essas equações podem ser discretizadas utilizando uma abordagem Euleriana (modelagem do fluido contínuo) ou Lagrangiana (modelagem de transporte de partículas). Nesse trabalho, o interesse é de uma abordagem fluido-fluido (água-ar) contínuos e, portanto, utilizando o modelamento Euleriano-Euleriano. Na abordagem Euleriana para o estudo de fluidos, há duas formas principais de discretização: o método de diferenças finitas e o de volumes finitos. O primeiro utiliza as equações de conservação

na sua forma diferencial parcial e são aproximadas com séries de Taylor ou algum ajuste polinomial usando os nós circundantes do volume de controle. É um método melhor aplicado para malhas regulares e geometrias mais simples. Já o segundo utiliza a forma integral das equações de conservação, e a região de interesse é dividida em pequenas sub-regiões chamadas de volumes de controle, onde as equações diferenciais são discretizadas e as equações algébricas resultantes são resolvidas iterativamente para cada unidade de volume. As principais vantagens do uso dessa técnica são sua adequação a geometrias complexas e a conservação de propriedades relevantes para cada volume de controle.

Essas equações governantes são apresentadas nesse capítulo na forma em que são tratadas no pacote computacional CFX 18.1, que se utiliza da técnica de volumes finitos. A equação que representa a conservação da massa ou equação da continuidade descreve a taxa de mudança da densidade de um fluido num ponto fixo no espaço, calculada através da Eq. (2):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad (2)$$

onde, U_j representa o vetor velocidade do escoamento, t é o tempo e ρ é a massa específica.

A equação de transporte da quantidade de movimento pode ser formulada como na Eq. (3):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i \quad (3)$$

onde P é a pressão estática; τ_{ij} é o tensor viscoso; b_i são as forças de campo, conforme Eq. (5). O tensor viscoso τ_{ij} pode ser definido através da Eq. (4). Neste trabalho, para os modelos de análise dos efeitos de *sloshing*, o termo de forças de campo b_i considera o efeito do campo gravitacional. Já para os modelos de avaliação da agitação de calda dentro do reservatório, esse efeito foi desprezado e o termo de forças de campo b_i é dado apenas pela força de Coriolis.

$$\tau_{ij} = -\frac{2}{3} \mu \delta_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_i} - \mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

$$b_i = -2(\varepsilon_{ijk} \Omega_j U_k) + g_i \quad (5)$$

onde U é o vetor velocidade tangencial; Ω é o vetor velocidade angular; μ é a viscosidade molecular; δ_{ij} representa o delta de Kronecker ($\delta_{ij}=1$ para $i=j$ e $\delta_{ij}=0$ para $i \neq j$).

3.3 Modelo de turbulência

3.3.1 Caracterização da turbulência e modelo adotado

As equações governantes Eq. (2) e (3) são válidas para permitir regimes que satisfaçam as restrições impostas pelas suposições feitas nos modelos, e a solução numérica depende da resolução da malha e do tamanho do passo de tempo suficientes para capturar os aspectos relevantes do escoamento. A turbulência ocorre em escalas de espaço e tempo muitas vezes muito pequenas e, no intuito de capturar os efeitos da turbulência usando as equações de Navier-Stokes em sua forma geral, malhas com resolução extremamente alta e escalas de tempo muito pequenas seriam necessárias.

Quando se avalia problemas reais de fluxos turbulentos é somente necessário conhecer os efeitos da turbulência no escoamento médio. Os modelos de turbulência são utilizados para descrever o comportamento das propriedades médias do escoamento, baseados nas equações da média temporal de Reynolds. Torna-se então necessária a utilização da média temporal de Reynolds (*Reynolds averaging*), gerando as equações de RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) (MICHELI, 2014).

As equações de RANS introduzem termos desconhecidos que contém o produto de quantidades flutuantes que agem como tensores adicionais ao fluido, chamados de tensores de Reynolds, que precisam ser modelados por equações adicionais para que o problema seja possível de ser resolvido (ANSYS, 2017).

A turbulência ocorre quando as forças de inércia do fluido tornam-se significativas quando comparadas às forças viscosas, e é caracterizada em altos números de Reynolds. A mais antiga proposta de modelagem da turbulência, a qual utiliza o conceito de viscosidade turbulenta, ainda constitui parte importante da maioria dos modelos de turbulência. A viscosidade turbulenta (μ_t) ou difusividade turbulenta é uma propriedade do escoamento e não do fluido como a viscosidade dinâmica (μ), pois depende fortemente

do estado da turbulência, ou seja, μ_t pode variar significativamente de um ponto a outro no interior do escoamento. Isso dificulta a avaliação desta propriedade, pois uma vez que ela depende da natureza do próprio escoamento, acaba gerando forte não linearidade na solução das equações. Os vórtices mais energéticos do escoamento turbulento são aqueles que, do ponto de vista estatístico, mais contribuem para o transporte turbulento de massa, energia e quantidade de movimento. Na impossibilidade de simular numericamente todos os componentes do espectro, devido às limitações computacionais, os menores vórtices (escalas) são incorporados ao modelo numérico após serem parametrizados pelos chamados modelos de turbulência (SOUZA et al., 2011).

Os modelos de turbulência baseados nas equações de RANS são conhecidos como modelos estatísticos devido ao procedimento de média estatística empregada para obter as equações. Cada modelo possui sua aplicabilidade para um determinado fenômeno. Vários modelos de turbulência são aplicados em muitos estudos numéricos de *sloshing* ou agitação de fluidos, com diferentes acurácias de predição, e consequentemente, exigindo esforços computacionais distintos. Essa escolha depende dos níveis de turbulência e dissipação na quebra das ondas, e quão complexas são as geometrias dos dispositivos *anti-sloshing* e das próprias paredes do reservatório.

Os modelos k- ϵ , k- ϵ *Realizable*, RNG k- ϵ , são modelos que resolvem duas equações de transporte, uma para a energia cinética turbulenta e outra equação relacionada à dissipação da energia cinética. Já o modelo k- ω SST além da energia cinética turbulenta, utiliza-se de uma equação para resolver a dissipação específica da energia cinética turbulenta. O modelo k- ϵ *Realizable* é como o k- ϵ padrão, mas utiliza uma função ao invés de uma constante em sua equação de viscosidade turbulenta (VERSTEEG & MALALASEKERA, 2007).

O Tensor das tensões de Reynolds que atua no fluido, presente na equação de quantidade de movimento, pode ser calculado utilizando um modelo de turbulência, que surge como resultado do procedimento de média do tempo ou de filtragem espacial, e é usado para simular o transporte da quantidade de movimento devido à turbulência (LIU et al., 2017).

Neste trabalho, o modelo de turbulência adotado como o procedimento computacional para resolver as equações de RANS foi o modelo k- ϵ . Liu et al. (2020) adotaram esse mesmo modelo num estudo de *sloshing* em um reservatório de combustível, e os erros máximos relativos entre os resultados numéricos e experimentais

foram inferiores a 5,0 %. Micheli et al. (2015) mostraram resultados de simulação satisfatórios, em comparação aos obtidos experimentalmente, na agitação de calda utilizando este modelo de turbulência, com baixos esforços computacionais.

Como são adicionados termos desconhecidos ao modelo, torna-se necessário o cálculo da viscosidade turbulenta. Para determinar a viscosidade turbulenta (μ_t), é preciso determinar os termos adicionais que foram resolvidos através da utilização do modelo de turbulência de duas equações k- ϵ , conforme Eq. (6) e Eq. (7):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \epsilon + P_{kb} \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon + C_{\epsilon 1} P_{\epsilon b}) \quad (7)$$

onde, ρ é a massa específica do fluido; t é o tempo; U_j é a velocidade média do escoamento; μ_t é a viscosidade turbulenta; P é a pressão estática; k é a energia cinética turbulenta; ϵ é a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta; P_{kb} e $P_{\epsilon b}$ representam a influência das forças de corpo; P_k é a produção de turbulência devido às forças viscosas; $C_{\epsilon 1}$, $C_{\epsilon 2}$, σ_k e σ_ϵ são constantes empíricas com os valores 1,44; 1,92; 1,0 e 1,3, respectivamente. Este modelo de turbulência k- ϵ com esses valores de constantes foi utilizado em muitos estudos de *sloshing*, como Liu et al. (2016), Saghi e Lakzian (2017), Liu et al. (2019), e Liu et al. (2020).

3.3.2 Verificação do refinamento da malha próximo à parede

Próximo à uma parede sem escorregamento, há altos gradientes das variáveis dependentes do escoamento (como velocidade, temperatura, etc.), e os efeitos viscosos nos processos de transporte são significantes. A representação desse processo numa simulação numérica gera algumas dificuldades: como considerar os efeitos viscosos na parede e como resolver a variação rápida dessas variáveis que ocorre dentro da região da camada limite.

Experimentos e análises matemáticas têm mostrado que a região próxima à parede pode ser dividida em 2 camadas. Na camada mais interna, o escoamento é quase laminar, e os efeitos viscosos são dominantes no transporte da quantidade de movimento e na transferência de calor. Mais afastado da parede, na camada logarítmica, a turbulência domina o processo de agitação. Assumindo que o perfil logarítmico é uma aproximação razoável da distribuição de velocidade próxima à parede, isso promove uma forma de calcular numericamente a tensão de cisalhamento como função da velocidade numa dada distância da parede. Essa relação é conhecida como função de parede. Dois métodos são comumente utilizados para o modelamento de um escoamento próximo à parede:

- O método de função de parede, onde se utiliza fórmulas empíricas que impõe condições adequadas próximas à parede, sem resolver a camada limite, economizando recursos computacionais. Esse método é utilizado na maioria dos códigos que utilizam a técnica de CFD, para os modelos de turbulência disponíveis. As maiores vantagens desse método é que se pode modelar altos gradientes de camadas cisalhantes próximos à parede com malhas relativamente grosseiras, gerando uma economia substancial de tempo e armazenamento de CPU. Isso também evita a necessidade de calcular os efeitos viscosos no modelo de turbulência
- O método do Baixo Número de Reynolds, que resolve os detalhes do perfil da camada limite através de uma malha extremamente refinada na direção normal à parede (maior número de divisões da camada limite), correspondendo a um maior número de nós. Esse método é utilizado em alguns modelos de turbulência como o SST (*Shear Stress Transport*). O tempo de processamento e armazenamento de CPU são mais altos que comparados ao método de função de parede, já que consegue calcular com maior resolução as variações de velocidade e temperatura próximas à parede.

Uma forma de avaliar a qualidade do refinamento da malha próximo à parede, de acordo com a escolha do modelo de turbulência adotado para a solução do problema, é a utilização de um adimensional chamado *Yplus*.

O *Yplus* (y^+) é a distância adimensional com referência à parede. É utilizado para verificar a localização do primeiro nó distante da parede, e com isso, serve como

informação sobre a resolução da malha próxima à mesma. O valor desse adimensional pode variar de acordo com o modelo de turbulência e o tipo de função de parede adotados, além do tipo de análise que se quer realizar para a solução do problema. No caso do modelo k-epsilon adotado neste trabalho, para a avaliação de deposição de soluto na parede do reservatório, admite-se valores de Y_{plus} menores que 300, assim como apresentado na análise numérico-experimental de Micheli et al. (2014). Ponzini et al. (2020) utilizou o modelo de turbulência k- ω SST numa análise hidrodinâmica do escoamento sob um casco de barco flutuante, comparando os resultados numéricos com os experimentais, e adotando o valor de Y_{plus} médio de 100. Esse adimensional pode ser calculado através da seguinte relação (ANSYS, 2017):

$$y^+ = \frac{\rho \cdot \Delta y \cdot u_t}{\mu} \quad (8)$$

onde,

u_t é a velocidade do escoamento tangencial à parede, distante Δy da mesma.

3.4 Modelamento da Superfície Livre

3.4.1 Condições de contorno e equações governantes

As condições de contorno requeridas para o problema de *sloshing* são paredes sólidas no contorno do reservatório e uma superfície livre. O *sloshing* ocorre em um reservatório fechado, e a velocidade do fluido e a temperatura (se aplicável) podem ser especificadas de forma explícita nas paredes do mesmo. Entretanto, um valor de pressão absoluta de referência precisa ser especificado em algum lugar dentro do domínio do fluido.

A condição inicial adotada nos modelos foi que não há movimento do fluido no instante $t = 0s$, e somente depois é aplicada a excitação no reservatório, conforme será detalhado no Capítulo 4. Neste tipo de problema, mais de um fluido está presente e a localização da superfície livre é dinâmica, não podendo ser especificada num primeiro momento, e deve ser obtida como parte da solução. A predição do fenômeno de *sloshing*

requer um modelo de simulação que possa examinar a superfície livre do líquido em um determinado período. Neste presente sistema, o método utilizado para resolver as equações de Navier-Stokes incompressíveis com a condição de contorno de superfície livre é o Modelo Multifásico Homogêneo (modelo Euleriano-Euleriano) (NICOLICI e BILEGAN, 2013). Um escoamento com superfície livre refere-se a uma situação de escoamento multifásico onde as fases são separadas por uma interface macroscópica distinta. A fração volumétrica do fluido considerado (fase α) é r , e $1 - r$ é a fração volumétrica do fluido secundário. Os valores da fração volumétrica são 0 ou 1, exceto próximo à interface. As fases não se misturam em uma escala microscópica, e compartilham o mesmo campo de velocidade ($U_i = U_j$), essencialmente, a equação de quantidade de movimento de uma única fase com a densidade e viscosidade da mistura. A equação da continuidade da soma das fases considerando o modelo homogêneo é representada pela Eq. (2). Já as equações de continuidade e de transporte da quantidade de movimento da fase α , e a soma das fases são calculadas através das Eq. (9), (10), e (11) (ANSYS, 2017):

Continuidade da fase:

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\alpha) + \frac{\partial}{\partial x_j}(r_\alpha \rho_\alpha U_{j\alpha}) = 0 \quad (9)$$

Transporte da quantidade de movimento da fase:

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\alpha U_{i\alpha}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(r_\alpha \rho_\alpha U_{j\alpha} U_{i\alpha}) = -r_\alpha \frac{\partial P}{\partial x_i} + r_\alpha \rho_\alpha g_i - \frac{\partial}{\partial x_j}(r_\alpha \tau_{ji}) + M_\alpha \quad (10)$$

Transporte da quantidade de movimento da soma das fases (modelo homogêneo):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j U_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho g_i - \frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_j} \quad (11)$$

onde,

$$\rho = \sum_\alpha r_\alpha \rho_\alpha \quad (12)$$

$$\tau_{ji} = \sum_\alpha r_\alpha \tau_{ji\alpha} \quad (13)$$

r_α é a fração volumétrica da fase α ; g é a aceleração da gravidade; τ_{ji} é o tensor de Reynolds; M_α é a soma das forças de interface (neste caso, a dispersão turbulenta e a transferência de quantidade de movimento associados com a transferência de massa).

3.4.2 Tensão superficial

O modelo de tensão superficial utilizado pelo CFX é baseado no modelo de Força Superficial Contínua (CSF - *Continuum Surface Force*) proposto por Brackbill et al. (1992). Essa abordagem modela a força de tensão superficial como uma força de volume concentrada na interface, em vez de uma força superficial. Deve ser definido um fluido primário como a fase α (fase líquida) e um fluido secundário como a fase β (normalmente uma fase gasosa). A força superficial contínua pode ser determinada através da Eq. (14):

$$\mathbf{F}_{\alpha\beta} = \mathbf{f}_{\alpha\beta} \delta_{\alpha\beta} \quad (14)$$

onde,

$$\mathbf{f}_{\alpha\beta} = -\sigma_{\alpha\beta} k_{\alpha\beta} \boldsymbol{\eta}_{\alpha\beta} + \nabla_s \sigma \quad (15)$$

$$\delta_{\alpha\beta} = |\nabla r_{\alpha\beta}| \quad (16)$$

onde, σ é o coeficiente de tensão superficial; $\boldsymbol{\eta}_{\alpha\beta}$ é o vetor normal da interface com sentido do fluido primário para o fluido secundário (calculado do gradiente de fração volumétrica suavizado); ∇_s é o operador gradiente na interface; e $k_{\alpha\beta}$ é a curvatura da superfície definida pela Eq. (17):

$$k_{\alpha\beta} = \nabla \cdot \boldsymbol{\eta}_{\alpha\beta} \quad (17)$$

Os dois termos somados do lado direito da Eq. (15) representam as componentes normal e tangencial da força de tensão superficial, respectivamente. A componente normal surge da curvatura da interface e a componente tangencial de variações no coeficiente de tensão superficial.

O termo $\delta_{\alpha\beta}$ é chamado de função delta da interface, com valor zero longe da interface, garantindo assim que a força de tensão superficial esteja ativa apenas perto da interface.

Quando a interface entre os dois fluidos cruza uma parede, é possível considerar a adesão da parede especificando o ângulo de contato que a interface faz com a parede através do fluido primário. O vetor normal da interface usado para os cálculos da curvatura e da força de tensão superficial deve satisfazer o ângulo de contato da parede (ANSY®, 2017).

3.5 Configuração dos modelos numéricos

As seguintes simplificações foram admitidas para configurar os modelos para avaliar os efeitos de *sloshing* no reservatório:

- Fluido primário (fase α) utilizado é viscoso, incompressível e newtoniano;
- Fluido secundário (fluido β) é modelado como gás ideal;
- O regime do escoamento é multifásico e transiente;
- O escoamento é isotérmico e turbulento;
- Foi considerada a ação das forças gravitacionais.

Já para configurar os modelos de avaliação da agitação da mistura dentro do reservatório, foram admitidas as seguintes simplificações:

- Fluido utilizado é viscoso, incompressível e newtoniano;
- O regime do escoamento é monofásico e permanente;
- O escoamento é isotérmico e turbulento;
- Foi desprezada a ação das forças gravitacionais;
- O reservatório é considerado totalmente cheio.

3.6 Qualidade dos elementos das malhas geradas

A qualidade de uma malha influencia diretamente, tanto na convergência de uma simulação, quanto na análise de seus resultados. Quando se compara os resultados de simulações com malhas com qualidades diferentes, é notável como elementos muito deformados acarretam na concentração de gradientes na região afetada do domínio.

Há diversos critérios disponíveis para avaliar a qualidade de malha e medir a deformação de seus elementos, dependendo do tipo de elemento. No caso dos elementos triangulares e tetraédricos, a qualidade é calculada como a relação mínima entre altura e comprimento base de cada lado do elemento. Já nos elementos quadráticos, a qualidade é calculada como o determinante relativo, que é a razão do menor determinante da matriz jacobiana dividido pelo maior determinante da matriz jacobiana.

Para os elementos prismáticos e hexaédricos, o mínimo de três diagnósticos é usado, porém a principal métrica está relacionada com a ortogonalidade dos elementos, ou seja, quão próximos os ângulos entre faces adjacentes dos elementos se aproximam do ângulo ótimo (90° para hexaedros, por exemplo). A Eq. (18) apresenta o cálculo utilizado na determinação do parâmetro de qualidade ortogonal, para cada elemento (SILVA, 2016):

$$\theta = \min \left(\frac{\vec{A}_e \cdot \vec{f}_e}{|\vec{A}_e| |\vec{f}_e|}, \frac{\vec{A}_e \cdot \vec{c}_e}{|\vec{A}_e| |\vec{c}_e|} \right) \quad (18)$$

onde A_e é a normal da face do elemento; f_e é um vetor do centroide do elemento ao centroide da face; c_e é um vetor do centroide do elemento ao centroide do elemento vizinho que compartilha a face em questão; o subscrito e varia de 1 até o número de faces do elemento.. A qualidade ortogonal do elemento é dada pelo menor valor calculado em todas as suas faces. A Figura 21 mostra a representação dos vetores dos elementos empregados no cálculo. Valores de qualidade ortogonal acima de 0,1 (10% de deformação) são considerados aceitáveis, e indicam malhas de qualidade razoável, conforme mostrado na Fig. 22. O valor máximo de θ é 1, que representa o elemento ideal.

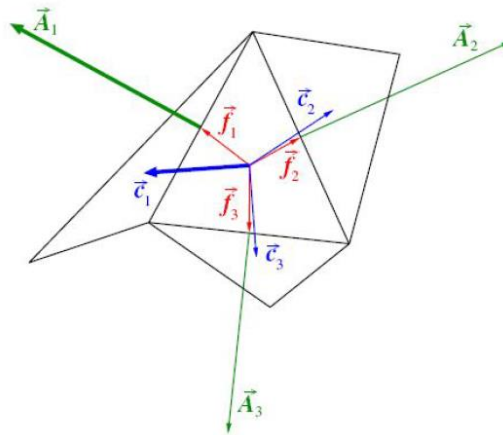


Figura 21 – Vetores empregados no cálculo de qualidade ortogonal (Silva, 2016).



Unacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

Figura 22 – Referências de qualidade ortogonal (ANSYS, 2017).

3.7 Variáveis de saída na utilização da CFD

3.7.1 Pressão na parede e Fração Volumétrica

Para os modelos transientes multifásicos para a análise do comportamento das ondas de *sloshing*, são duas as principais variáveis a serem analisadas, a fração volumétrica da fase α principal (água) e a pressão de impacto nas paredes do reservatório.

No caso da fração volumétrica, é utilizado o valor de 50% para a identificação da superfície livre através de uma isosuperfície, onde é mostrada uma superfície tridimensional de regiões com mesmo módulo de uma determinada variável, sendo muito utilizada em problemas de geometrias e escoamentos complexos. É utilizada para verificar o comportamento das ondas, e identificar as instabilidades e efeitos do *sloshing*.

A pressão na parede dos reservatórios (neste caso, é verificada a pressão total) é utilizada para avaliação da relevância dos impactos do *sloshing* sob as mesmas, e a influência dos arranjos propostos para a redução desses impactos. Como trata-se de modelos multifásicos, é necessária a definição da pressão total a partir da equação de Bernoulli, porém em função da fase α (fluido primário), conforme determinado na Eq. (19) abaixo:

$$P = P_{est} + \sum_{\alpha} \frac{1}{2} r_{\alpha} \rho_{\alpha} |U|_{\alpha}^2$$

(19)

onde, P_{est} é a pressão estática; $|U|$ é o módulo da velocidade do escoamento.

3.7.2 Perfis de velocidades do escoamento

A velocidade do escoamento pode ser visualizada no pós-processador em regiões definidas pelo usuário, de acordo com uma escala degradê, das seguintes formas:

- Mapa de velocidades: representação dos módulos de velocidade numa superfície, com delimitações (contornos) das regiões de mesmo módulo;
- Campo de Vetores: representação vetorial projetada numa superfície, onde também é possível visualizar direção e sentido do escoamento nas diversas regiões das geometrias em estudo;
- Isosuperfícies: uma isosuperfície de velocidade seria uma superfície constituída de todos os pontos do volume de controle onde a velocidade chegasse a um determinado módulo desejado.

3.7.3 Tensão de cisalhamento na parede do reservatório

A tensão de cisalhamento para o escoamento monofásico de um fluido como a água (fluido utilizado nessa simulação numérica) é determinada pela Lei de Newton da Viscosidade, onde a tensão é proporcional ao gradiente negativo da velocidade local, apresentada na Eq. (20). O fluido comunica parte da sua quantidade de movimento para a região imediatamente adjacente de líquido na direção transversal ao escoamento. O fluxo da quantidade de movimento ocorre da região de maior velocidade para a região de menor velocidade. Assim, pode-se interpretar o gradiente de velocidade como sendo a força impulsora do transporte da quantidade de movimento (BIRD et. al, 2002).

$$\tau_{yx} = -\mu \cdot \frac{du_x}{dy} \quad (20)$$

Essa variável de saída do modelo é importante para a análise da deposição de resíduos na parede do reservatório, na região inferior do mesmo.

CAPÍTULO 4

MODELO COMPUTACIONAL

Todas as licenças dos softwares utilizados para o desenvolvimento deste trabalho são de propriedade da empresa Máquinas Agrícolas Jacto S/A.

Neste trabalho, o comportamento do *sloshing* é avaliado num reservatório de 4500 litros de um pulverizador agrícola para culturas não perenes. Um agitador mecânico é posicionado perto da região inferior do reservatório na parede traseira para promover a agitação da calda de defensivos dentro do mesmo. Para análise dos efeitos do *sloshing* nos modelos transientes de CFD, a influência do agitador é negligenciada, devido ao alto esforço computacional necessário para essa consideração. Entretanto, quando avalia-se alguns modelos de simulação propostos para reduzir esses efeitos, a influência dos dispositivos dentro do reservatório na agitação da mistura é considerada um requisito para a solução.

Para o início da fase de pré-processamento é necessária a construção do modelo 3D do reservatório de defensivos sem agitação e do reservatório com o agitador mecânico. Estas geometrias foram obtidas com auxílio do programa de CAD *Creo Parametric 4.0*.

Após isso, foram geradas malhas dos modelos utilizando o código comercial ICEM CFD 18.1. Através desse código, foi possível gerar a estrutura discretizada em volumes finitos, a partir das geometrias 3D. Foram estudadas algumas malhas com objetivo de representar o fenômeno com suficiente detalhamento, exigindo o mínimo esforço computacional possível. A análise de incertezas numéricas que envolvem a discretização das malhas é apresentada no Capítulo 5. Neste trabalho, o critério mínimo de qualidade ortogonal dos elementos foi fixado em 0,275, e assegurou-se de que ao menos 90% dos elementos tenham qualidade ortogonal acima de 0,8, em todas as malhas estudadas.

Nas fases de processamento e pós-processamento, as soluções das simulações numéricas foram realizadas utilizando o código de CFD comercial, ANSYS CFX 18.1.

4.1 Modelos para a análise de *sloshing*

4.1.1 Geometria dos modelos e excitação externa

O *sloshing* de líquidos em reservatórios é um fenômeno físico não-linear complexo, e as distribuições dinâmicas das pressões de impacto nas paredes dos mesmos são consideradas um dos fatores chaves no design desses reservatórios. A Figura 23 mostra a posição dos pontos de captura de pressão na parede frontal do reservatório para a comparação dos efeitos de *sloshing*.

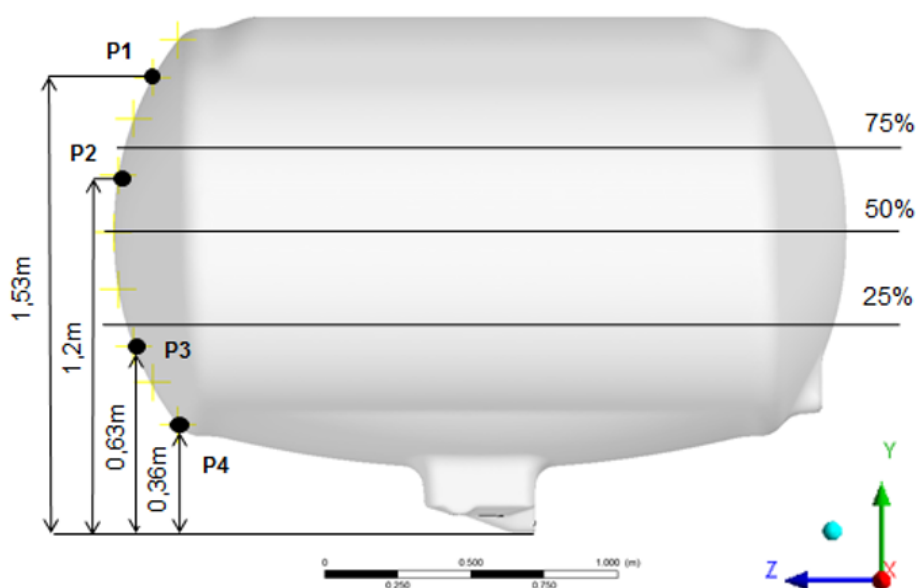


Figura 23 - Posições dos níveis de enchimento do reservatório de 4500 litros e dos pontos de captura da pressão na parede frontal.

A avaliação dos efeitos de *sloshing* devido ao movimento de frenagem do pulverizador automotriz é realizada em três diferentes níveis de enchimento (25%, 50% e 75%) e sem agitação mecânica, no intuito de definir as condições mais críticas para o dimensionamento estrutural. A Figura 24 mostra a simplificação da aceleração do veículo versus o tempo na direção z (direção horizontal positiva da direita para a esquerda) que é aplicada aos modelos. No início, o pulverizador acelera numa linha reta (na direção z) até atingir a máxima velocidade de trabalho permitida para as condições do solo do talhão de uma propriedade agrícola, e depois, desacelera no final da linha de aplicação daquele talhão. Esse cenário poderia ocorrer se fosse aplicada uma frenagem brusca da máquina

com a intenção de evitar uma colisão da barra de pulverização com algum obstáculo (cerca da propriedade, árvores ou postes elétricos), ou com a máquina se preparando para fazer uma manobra e entrar em outra linha de aplicação, por exemplo.

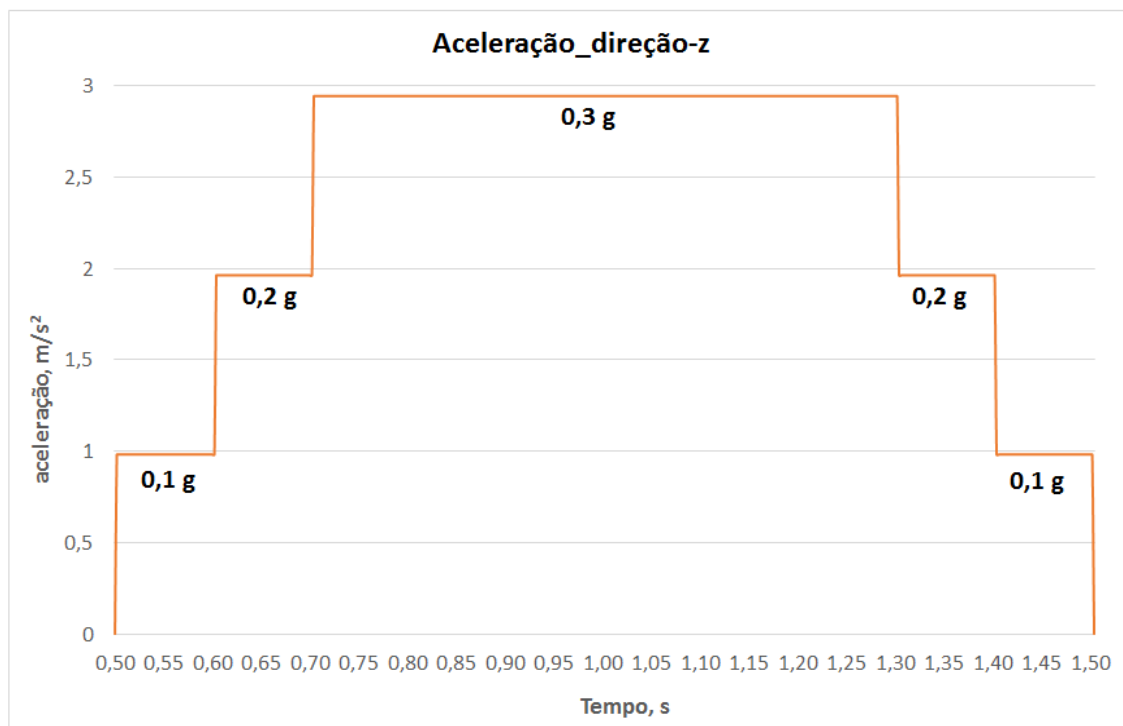


Figura 24 - Aceleração e desaceleração na direção z no início do período da simulação.

É necessário entender o que é mais importante para o dimensionamento das paredes do reservatório, entre o nível de enchimento do mesmo (maior volume de calda de defensivos), ou o volume de ar que permite maior deslocamento do volume da calda dentro do reservatório. Portanto, isso é investigado para otimizar o número de modelos de simulação para verificar a eficiência dos arranjos propostos para reduzir os efeitos de *sloshing*.

Xue et al. (2017) conduziram uma investigação experimental detalhada para determinar os efeitos de pressão devido ao *sloshing* sob as paredes de um reservatório e dos defletores adotados. Eles utilizaram diferentes configurações de defletores verticais, sob a atuação de uma variação grande de frequências de excitação, incluindo: defletores verticais montados na parede inferior do reservatório; defletores parciais montados nas paredes laterais; defletores montados na parede inferior e que ultrapassam o nível inicial de enchimento do reservatório; e defletores verticais perfurados. Os resultados experimentais mostraram que a influência dos defletores altera os campos de escoamento,

e avaliando os diferentes modos de frequência natural do fluido dentro do reservatório, foi possível suprimir de forma efetiva as pressões de impacto nas paredes.

Neste trabalho, dois diferentes arranjos para reduzir os efeitos de *sloshing* nas paredes do reservatório de um pulverizador são apresentados na Fig. 25. No desenho desses arranjos propostos as restrições levam em consideração a necessidade de manter uma boa agitação da calda dentro do reservatório sem ter que adicionar um outro agitador (mecânico ou hidráulico).

Os arranjos 1 e 2 são baseados no uso de defletores parciais no intuito de não prejudicar a eficiência de agitação da calda no reservatório. O primeiro arranjo utiliza dois defletores verticais parciais com um vão central, enquanto o segundo arranjo utiliza um defletor vertical parcial com cinco furos para permitir o fluxo através do defletor.

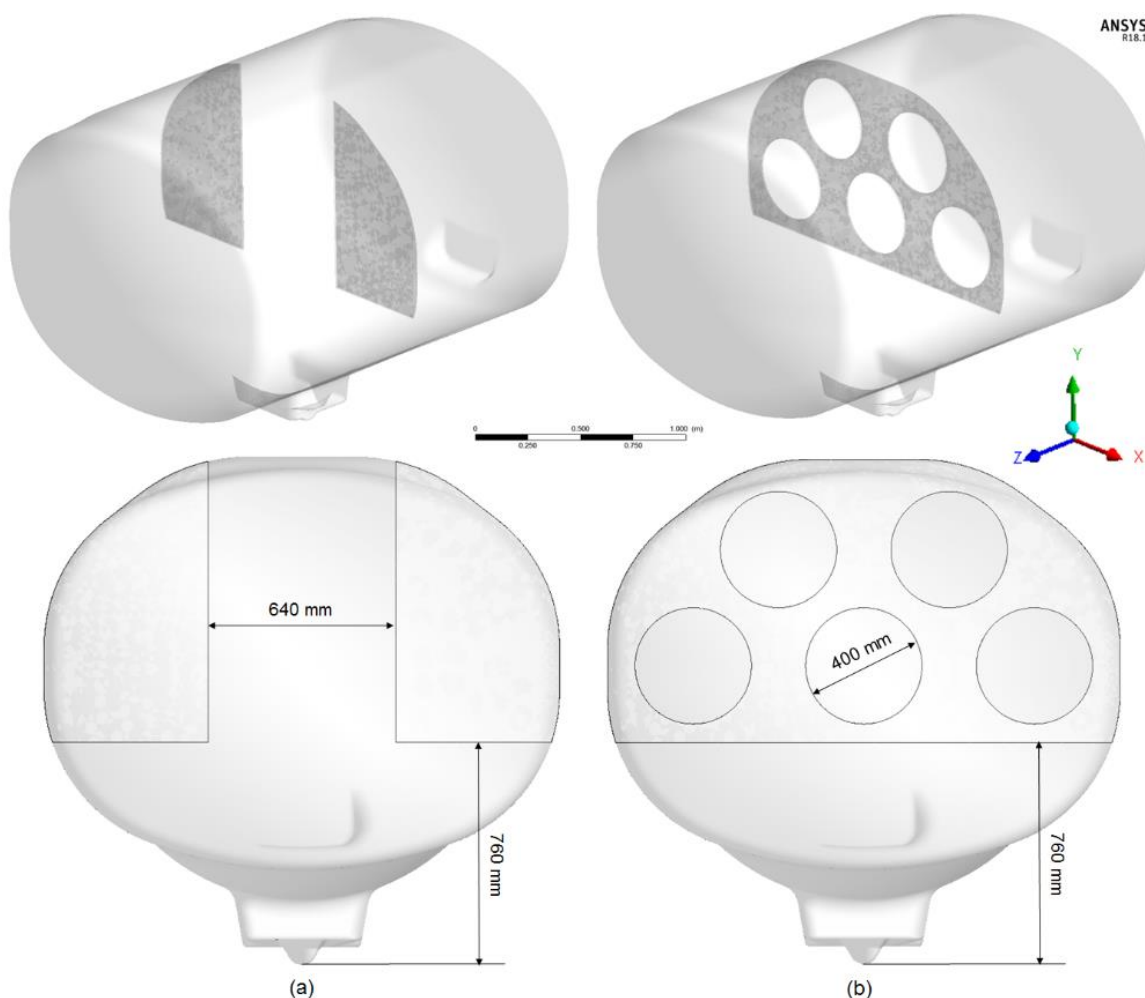


Figura 25 - Propostas para redução dos efeitos de *sloshing*: (a) arranjo 1, e (b) arranjo 2.

4.1.2 Malhas e condições de contorno

A Figura 26 mostra as malhas não estruturadas utilizadas nos modelos do reservatório sem defletores (2840708 elementos e 572126 nós), com o arranjo 1 (3097598 elementos e 656222 nós), e com o arranjo 2 (3246812 elementos e 701591 nós). O valor mínimo de qualidade ortogonal dos elementos foi 0,28.

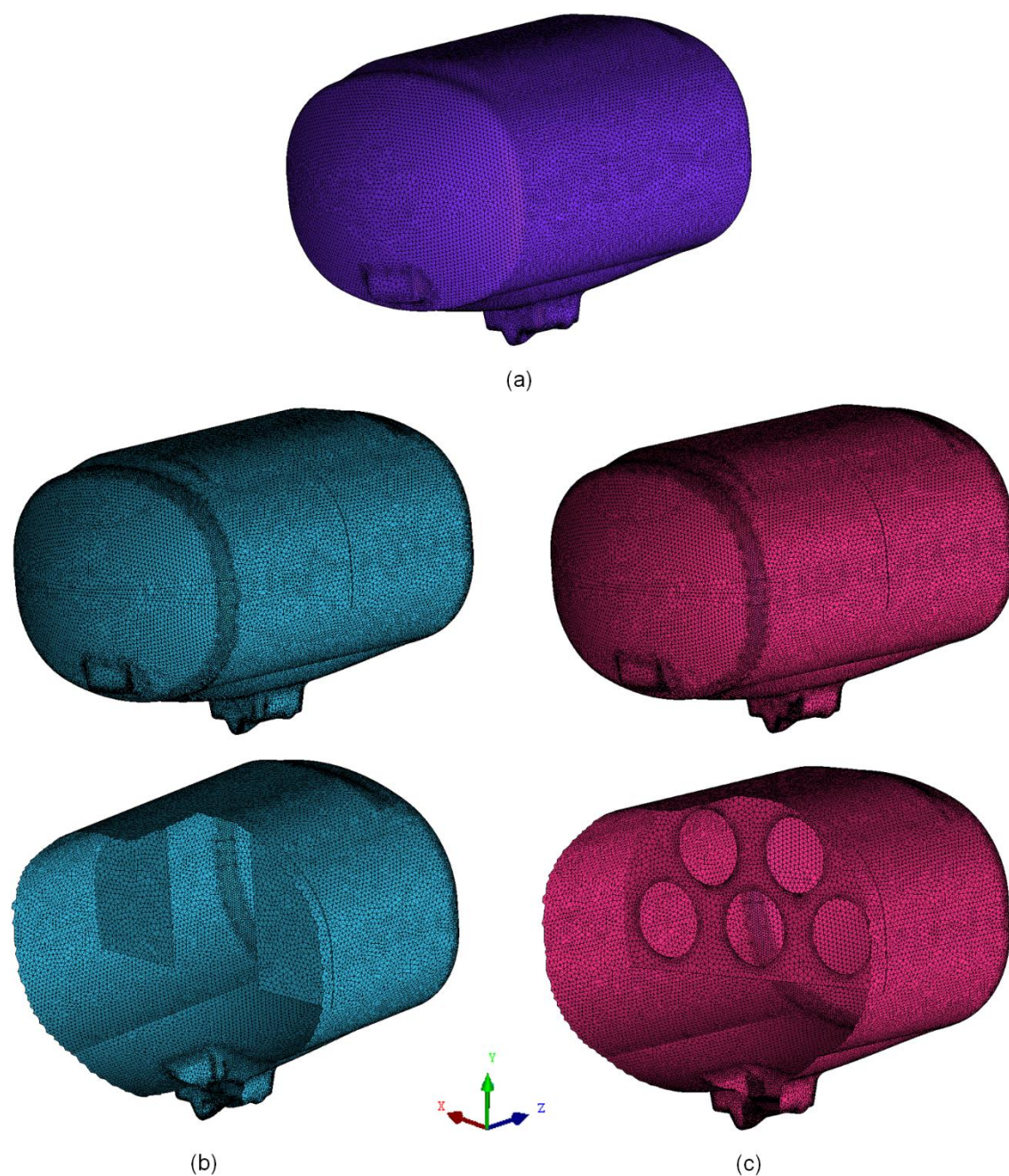


Figura 26 - Malhas do reservatório para avaliação do *sloshing* nas condições: (a) sem defletores, (b) com o arranjo 1, e (c) com o arranjo 2.

No pré-processamento, as definições dos parâmetros do modelo são descritas brevemente como segue:

- simulação em regime transiente, com passos de tempo = 0,01s;
- fluido primário definido como água - contínuo;
- fluido secundário definido como ar gás ideal - contínuo;
- temperatura de referência igual a 25°C;
- escoamento isotérmico;
- modelo multifásico homogêneo com modelo de superfície livre;
- Coeficiente de tensão de superfície (σ) = 0,072 N/m;
- modelo de turbulência k-epsilon;
- aceleração da gravidade (eixo y) = 9,8 m/s;
- aceleração no eixo z conforme curva da Seção 4.1.1;
- domínio estacionário;
- condição inicial com $v_x = v_y = v_z = 0$ m/s, e pressão estática de acordo com o nível de enchimento do reservatório (25%, 50% ou 75%).

4.2 Modelos para a análise de agitação

Com o intuito de manter nos arranjos propostos os níveis de agitação da calda do reservatório sem defletores, um requisito de projeto é alcançar os níveis de tensão de cisalhamento nas paredes inferiores do reservatório acima de 0,3 Pa (MICHELI et al., 2015). É possível observar que a variação de velocidade entre camadas de fluxo promove regiões de maior ou menor tensão de cisalhamento. Maiores valores da tensão de cisalhamento nas paredes significam maiores gradientes de velocidade nessas regiões e, portanto, maior o movimento do fluido que em regiões com baixos valores de tensão. Como resultado disso, regiões com baixos valores de tensão de cisalhamento são mais sujeitas a ocorrências de acúmulo de resíduos.

Nesse trabalho, foram utilizados modelos monofásicos (água), para avaliar o perfil de velocidade e a distribuição de tensão de cisalhamento na parede do reservatório e verificar as regiões de baixo fluxo como potenciais concentradores de resíduos. Essa é uma solução de modelamento simplificadora já validada experimentalmente, e requer um

esforço computacional muito menor que uma solução com um modelo multifásico sólido-líquido como o modelo Euler-Euler (MICHELI, 2014).

4.2.1 Geometria dos modelos

O desenho 3D do reservatório de 4500 litros do pulverizador com agitação mecânica foi mostrado na Fig. 4, e os detalhes do agitador mecânico com 3 aletas são apresentados na Fig. 27.

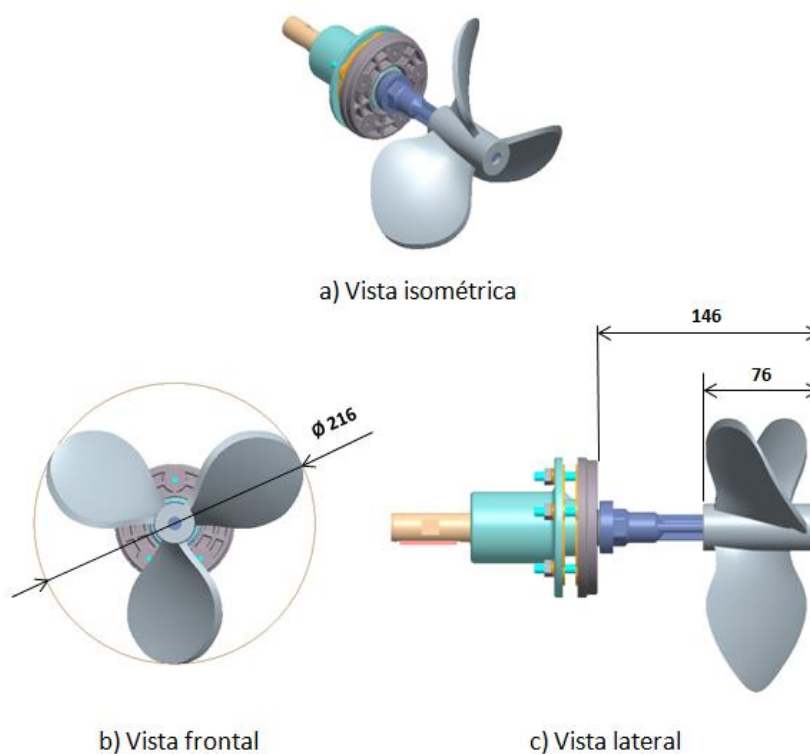


Figura 27 - Modelo 3D do agitador mecânico na montagem do reservatório.

4.2.2 Malhas e condições de contorno

Na geração de malha dos modelos em regime permanente, foram criados 2 domínios diferentes, sendo 1 domínio estacionário (o reservatório) e 1 domínio rotativo (agitador mecânico). Dessa forma foi possível otimizar o número de elementos do modelo, refinando a malha apenas nas regiões de interesse, próximo à parede do reservatório e às pás do agitador mecânico (JI et al., 2012; WU et al., 2018; LONG et al., 2019). Todas as malhas foram geradas com elementos tetraédricos e a camada limite

dividida em 3 camadas de elementos prismáticos para refinamento da região próxima à parede.

A Figura 28 mostra as malhas não estruturadas utilizadas nos modelos do reservatório sem defletores (2849465 elementos e 575230 nós), com o arranjo 1 (3749265 elementos e 856811 nós), e com o arranjo 2 (3261019 elementos e 704357 nós). O valor mínimo de qualidade ortogonal dos elementos foi 0,28.

Para a simulação numérica de um agitador mecânico do tipo hélice, utilizando um domínio rotativo, é necessário um alto grau de refinamento da malha da hélice, correspondendo a números elevados de elementos e nós. Nesse caso, para reduzir os esforços computacionais, torna-se necessária a utilização da interface de periodicidade rotacional.

As interfaces dos domínios são utilizadas para conectar as malhas de duas regiões dentro do próprio domínio ou entre eles, e essa conexão pode ser realizada de 2 formas: conexão direta (elemento a elemento) ou conexão GGI (*General Grid Interface*). Na primeira, a localização de todos os nós de um lado da interface corresponde diretamente com a de todos os nós do outro lado da mesma, dentro da tolerância da malha definida pelo projetista. A conexão GGI refere-se àquelas onde a discretização de ambos os lados da interface são diferentes. Assim, é permitida a conexão de diferentes posições de nós, tipos de elementos e formato de superfícies (ANSYS, 2017).

Interfaces de periodicidade podem utilizar ambas as formas de conexão. No caso da periodicidade rotacional, os dois lados da interface podem ser mapeados por uma única transformação rotacional sobre um mesmo eixo. Também foram utilizadas interfaces entre o domínio do reservatório (estacionário) e o domínio do agitador mecânico (rotativo). Nesse caso, é necessário informar ao pré-processador qual a relação angular entre os dois lados da interface. Como o domínio rotativo foi dividido em 3 partes, essa relação é de 120° para 360°. A Figura 19 mostra todas as interfaces do domínio.

A malha do domínio rotativo que representa o agitador mecânico possui 130464 elementos e 27858 nós, e pode ser visualizada conforme Figura 30. O recurso da interface de periodicidade rotacional permitiu o consumo de apenas 1/3 do número de elementos do domínio completo.

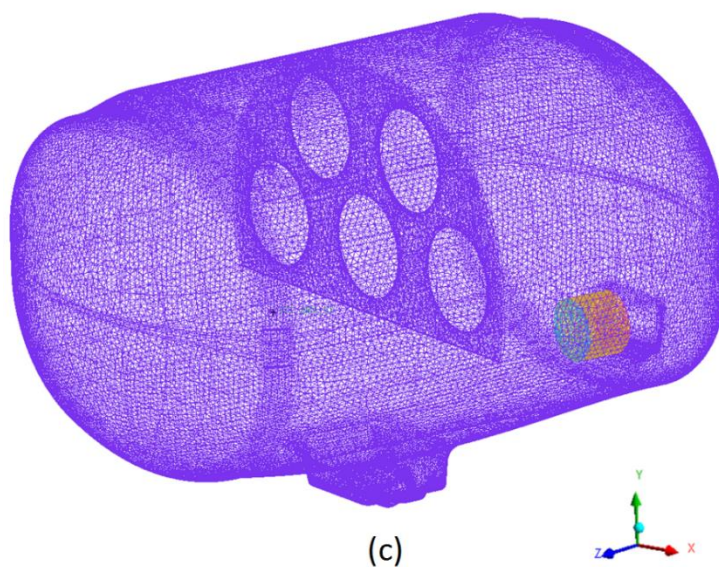
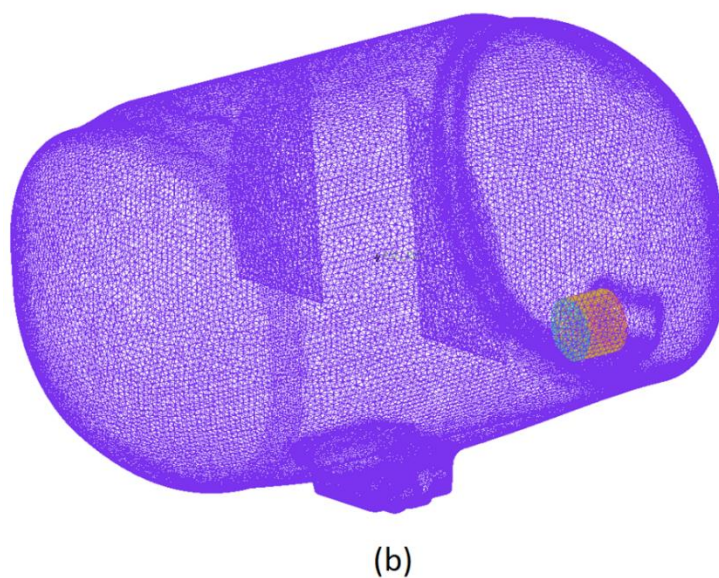
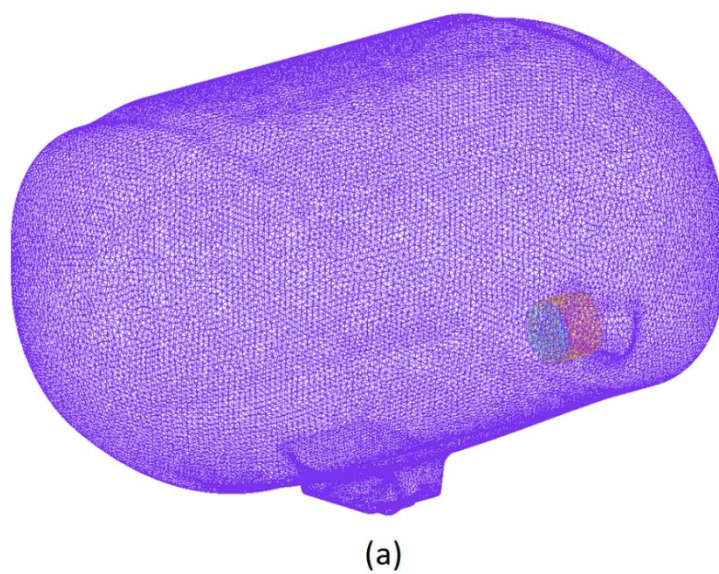
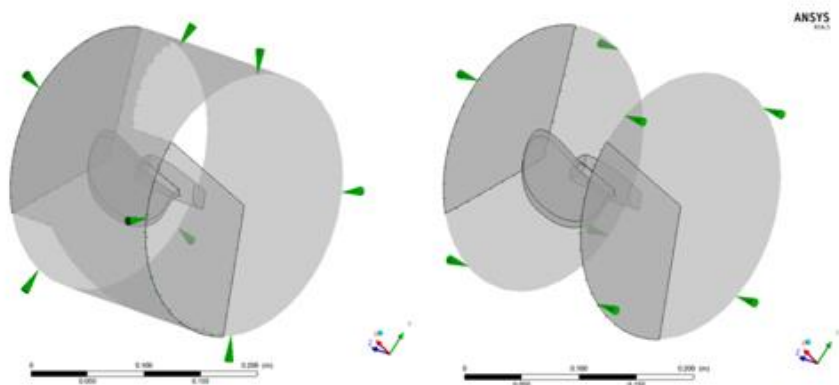
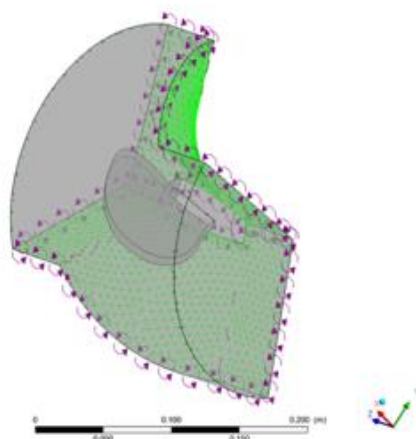


Figura 28 – Malhas do reservatório para a avaliação da agitação nas condições: (a) sem defletores, (b) com o arranjo 1, e (c) com o arranjo 2.

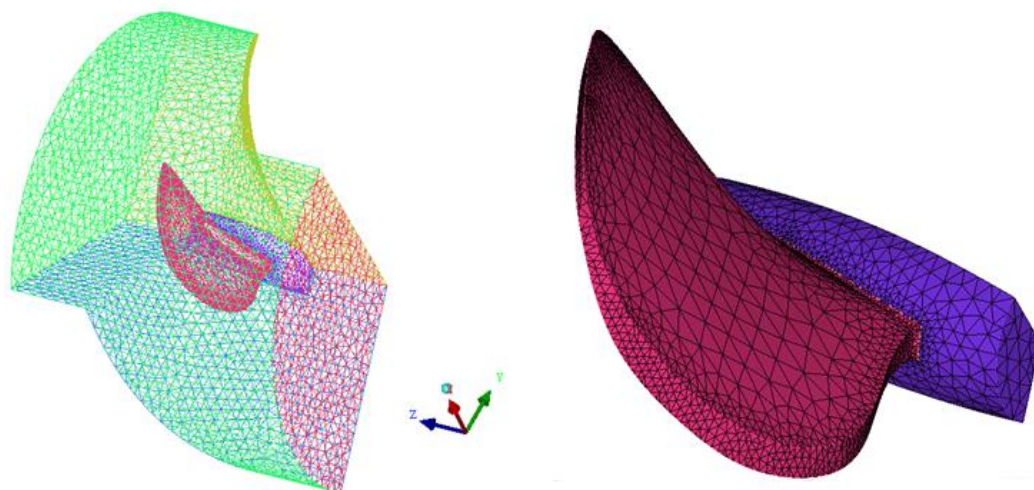


a) Interfaces com passo angular de 120° para 360°



b) Interface periódica rotacional em relação ao eixo Z.

Figura 29 – Interfaces do domínio rotativo.



a) Vista geral

b) Detalhes dos elementos da pá

Figura 30 – Malha do domínio rotativo do agitador mecânico.

No pré-processamento, as definições dos parâmetros do modelo são descritas brevemente como segue:

- modelo monofásico;
- fluido definido como água com temperatura de referência igual a 25°C ;
- simulação em regime permanente;
- escoamento isotérmico;
- modelo de turbulência k-epsilon;
- rotação do agitador mecânico igual a 540 rpm;
- desprezada a ação da gravidade;
- condição inicial com o nível completo de enchimento do reservatório.

4.3 Critérios de Convergência

Todas as simulações foram realizadas numa CPU com oito processadores em paralelo de modelo Intel (R) Core(TM) i7-6700HQ CPU @2.6 GHz, com 16 GB de memória RAM e sistema operacional Windows 10.

A convergência numérica adotada para todos os modelos ocorreu no momento em que, a soma dos resíduos normalizados fosse menor que 1E-04 para todas as variáveis, e que houvesse a estabilização de uma variável de saída do modelo.

No caso dos modelos em regime transiente, definiu-se o controle de convergência com número mínimo de 1 e máximo de 30 interações para cada passo de tempo. A simulação é interrompida e não há sequência para o próximo passo de tempo caso não ocorra a convergência dentro do número máximo de interações. A variável de saída adotada como ponto de monitoramento foi a estabilização do cálculo da fração volumétrica de água também para cada passo de tempo. Foi simulado o regime transiente de 6 segundos para esses modelos, sendo que cada análise teve duração mínima de 84 horas até à convergência.

Para os modelos em regime permanente, o mínimo de iterações para a convergência adotado foi 10 e o máximo 1000 iterações. A variável de saída adotada como ponto de monitoramento foi a estabilização do torque do agitador mecânico. As simulações tiveram duração mínima de três horas até à convergência.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com os resultados obtidos nesse estudo numérico foi possível avaliar a viabilidade de utilização dos modelos transientes com a consideração de superfície livre para a predição do fenômeno de *sloshing*, obtendo os perfis de pressão de impacto nas paredes do reservatório e analisando possíveis arranjos como soluções para a mitigação dos efeitos do mesmo. Além disso, foi avaliada a influência desses arranjos em relação à eficiência de agitação utilizando os modelos em regime permanente, através dos perfis de tensões de cisalhamento na parede inferior do reservatório para prever as regiões de deposição de resíduos.

5.1 Avaliação das incertezas numéricas

Na utilização de modelamentos numéricos baseados em volumes finitos, parâmetros como o refinamento das malhas e o tamanho do passo de tempo entre as interações são muito importantes, pois influenciam diretamente a acurácia, a estabilidade e a eficiência computacional de simulações de CFD, sendo necessário o estudo de dependência de ambos (JIANG et al., 2015; LYU et al., 2017; SUFYAN et al., 2017). Portanto, no intuito de garantir soluções de alta qualidade de modelamento, essas incertezas foram analisadas no modelo transiente do reservatório sem defletores com nível de enchimento de 75%, como referência para todos os demais casos presentes neste trabalho. Quatro malhas não estruturadas foram geradas para avaliar a dependência dos resultados dos modelos propostos em relação à malha, sendo elas: malha grosseira (2272566 elementos e 465143 nós); malha base (2840708 e 572126 nós); malha com refinamento médio (3.578074 elementos e 703982 nós); e a malha com alto refinamento (4419448 elementos e 767509 nós). A Tabela 1 resume os resultados da verificação de dependência da malha para os modelos transientes do reservatório sem defletores. Nota-se que ϕ é a diferença relativa das soluções obtidas entre dois níveis diferentes de

refinamento da malha, e p é a ordem de convergência estimada, que são definidas através das equações Eq. (21) e Eq. (22):

$$\varphi = \frac{(f_I - f_{II})}{f_{II}} \quad (21)$$

$$\frac{f_2 - f_3}{r_{23}^p - 1} = r_{34}^p \left(\frac{f_3 - f_4}{r_{34}^p - 1} \right) \quad (22)$$

onde, f representa o valor da solução numérica para a pressão de pico no ponto P4; os índices I e II indicam a malha menos refinada e a malha mais refinada na comparação, respectivamente; a taxa de refinamento da malha $r_{23} = n_e3/n_e2$ e $r_{34} = n_e4/n_e3$; n_e representa o número de elementos da malha; os índices 2, 3 e 4 indicam as malhas base, com médio e alto refinamentos, respectivamente. Nesse estudo, a taxa de refinamento da malha é constante, sendo $r_{I-II} = r_{23} = r_{34} = 1,26$. Portanto, a ordem de convergência pode ser simplificada através da Eq. (23):

$$p = \ln[(f_2 - f_3)/(f_3 - f_4)]/\ln(r) \quad (23)$$

TABELA 1 – ANÁLISE DA DEPENDÊNCIA DE MALHA PARA OS MODELOS TRANSIENTES DO RESERVATÓRIO SEM DEFLETORES

Malha	Descrição	Número de Elementos (n_e)	Qualidade Mínima do Elemento (ANSYS®, 2017)	Valores de pico de pressão em P4 (Pa)	Diferença relativa (φ)
1	Grosseira	2272566	0,185	sem convergência	-
2	Base	2840708	0,275	14195	3,4%
3	Refinamento Médio	3578074	0,313	13732	2,4%
4	Alto Refinamento	4508373	0,396	13405	$p = 1,51$

Nota-se que a malha grosseira, com menor refinamento, não permitiu a convergência do modelo na fase de processamento, e foi desconsiderada para a continuidade do estudo. A dependência da malha em relação à diferença relativa φ entre as malhas com refinamento médio e base foi igual a 3,4%. Já no caso dos resultados obtidos entre as malhas com refinamentos médio e alto foi igual a 2,4%. Com base nesses resultados pode-se afirmar que não foi possível identificar alta sensibilidade dos modelos com relação aos resultados de pressão de pico obtidos, considerando essa variação de refinamento das malhas proposta.

O valor de p obtido indica que o método computacional utilizado tem ordem de acurácia entre 1 e 2, que é a tendência geral observada em simulações de *sloshing*, como por exemplo, visto em Liu et al. (2016). No caso do reservatório sem defletores, todos os resultados dos modelos transientes presentes nesse trabalho são obtidos utilizando a malha base, que permite maior redução do esforço computacional devido ao menor refinamento, e consequentemente, menor tempo de simulação. As outras malhas dos demais modelos transientes e dos modelos de agitação em regime permanente são baseadas na qualidade mínima dos elementos da malha base, que também é mostrada na Tabela 1.

De forma similar, três diferentes passos de tempo foram adotados para a análise de dependência desse parâmetro, mantendo o refinamento da malha base, sendo eles: pequeno (0,005 s), médio (0,01 s) e grande (0,02 s), com uma relação constante entre eles $r_{12} = r_{23} = 2$. A Tabela 2 mostra o resumo dos resultados da verificação de dependência do passo de tempo para os modelos transientes do reservatório sem defletores. Nota-se que a diferença relativa ϕ entre as três opções é menor que 4%.

TABELA 2 – ANÁLISE DA DEPENDÊNCIA DE PASSO DE TEMPO PARA OS MODELOS TRANSIENTES DO RESERVATÓRIO SEM DEFLETORES

Passo de Tempo	Descrição	Tamanho (s)	Valores de pico de pressão em P4 (Pa)	Diferença relativa (ϕ)
1	Pequeno	0,005	14350	1,1%
2	Médio	0,01	14195	3,4%
3	Grande	0,02	13728	$p = 1,59$

Ambos os resultados do teste de dependência fornecem evidências de que as soluções são praticamente insensíveis ao refinamento da malha e ao tamanho do passo de tempo na faixa considerada. O passo de tempo entre as interações igual a 0,01 s foi adotado para todos os modelos transientes.

5.2 Validação da frequência natural e modos de ressonância em função da teoria linear

Através de uma simplificação do modelamento do reservatório sem defletores como um reservatório de seção retangular na direção x , é possível utilizar a teoria linear

de *sloshing* descrita no Capítulo 3 para identificar se a excitação externa aplicada ao reservatório trouxe as condições de ressonância ao movimento de *sloshing* do fluido dentro do mesmo, e consequentemente altos níveis de impacto das ondas formadas.

O cálculo da frequência natural de *sloshing* para cinco modos de ressonância através da Eq. (1) é mostrado na Tabela 3 abaixo. Foram considerados os valores de L igual a 2,5m, e h iguais a 0,37 m (nível 25%), 0,73 m (nível 50%) e 1,1 m (nível 75%).

TABELA 3 – VALORES DE FREQUÊNCIA NATURAL DO FLUIDO EM HZ, COM TRÊS NÍVEIS DE ENCHIMENTO PARA OS MODOS DE 1 A 5

Modo	Nível de enchimento do reservatório		
	25%	50%	75%
1	2,31	2,99	3,30
2	4,24	4,84	4,95
3	5,72	6,06	6,08
4	6,85	7,02	7,02
5	7,78	7,85	7,85

Utilizando a condição de enchimento de 75%, é realizada uma análise no domínio da frequência das amplitudes da pressão na parede do reservatório sob o ponto P1 (ponto de captura de pressão mais alto na parede frontal) em relação à frequência de excitação, através de uma transformada de Fourier (FFT). E após isso, são comparados os resultados com os modos de frequência natural do fluido calculados através da teoria linear, conforme mostrada na Fig. 31.

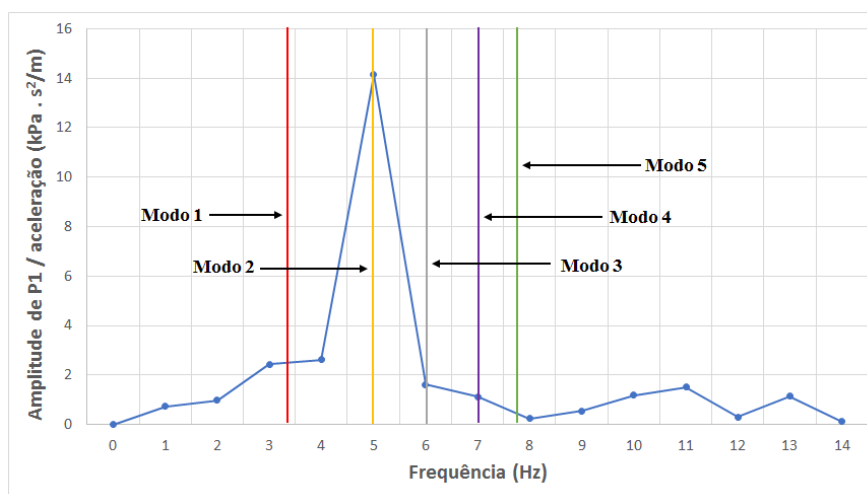


Figura 31 – FFT da pressão sob P1 para o reservatório com nível 75% sob a ação da aceleração proposta para os modelos.

Alguns estudos publicados anteriores a esse trabalho reportam que o comportamento do fluido atinge grandes elevações de *sloshing* nos primeiros modos de frequência natural (AKYILDIZ e ERDEM ÜNAL, 2006; JUNG et al., 2015). A transformada de Fourier da pressão na parede sob o ponto P1, que é apresentada na Fig. 31, mostra que o segundo modo de ressonância do fluido corresponde ao pico de amplitude para a frequência de excitação devido à aceleração de frenagem do pulverizador; no entanto, outros modos de frequências naturais e efeitos impulsivos também afetam os movimentos do *sloshing* sob condições de frequências de excitação maiores.

O comportamento do fluido durante o impacto, após a formação da primeira onda, tem uma melhor predição com o uso de análises em CFD que com modelos analíticos como a teoria linear, pois esse último método desconsidera os parâmetros não lineares como a viscoelasticidade e a tensão de superfície, que são propriedades do fluido. Os valores de elevação do *sloshing* captados pelos modelos numéricos num regime transiente com diversas instabilidades geradas são maiores que nas predições da teoria linear e da teoria linear modificada (GOUDARZI e SABBAGH-YAZDI, 2012).

5.3 Resultados dos modelos em regime transiente – Efeitos do *sloshing*

Das análises numéricas, é possível identificar a formação da superfície livre do volume de água dentro do reservatório através das isosuperfícies com valor de fração volumétrica igual a 0,5 (CAVALAGLI et al., 2017; MOČILAN et al., 2017). As Figuras 32, 33 e 34 mostram o perfil das ondas de *sloshing*, e outras instabilidades desse fenômeno, formadas durante o tempo de desaceleração imposta nos modelos conforme apresentado na Fig. 24, simulando a operação de frenagem de um pulverizador automotriz com um reservatório sem defletores verticais no interior do mesmo. Nota-se no lado esquerdo das figuras o momento em que ocorre o deslocamento de água contra a parede frontal do reservatório, e no lado esquerdo das mesmas na parede oposta, para cada nível de enchimento do reservatório analisado.

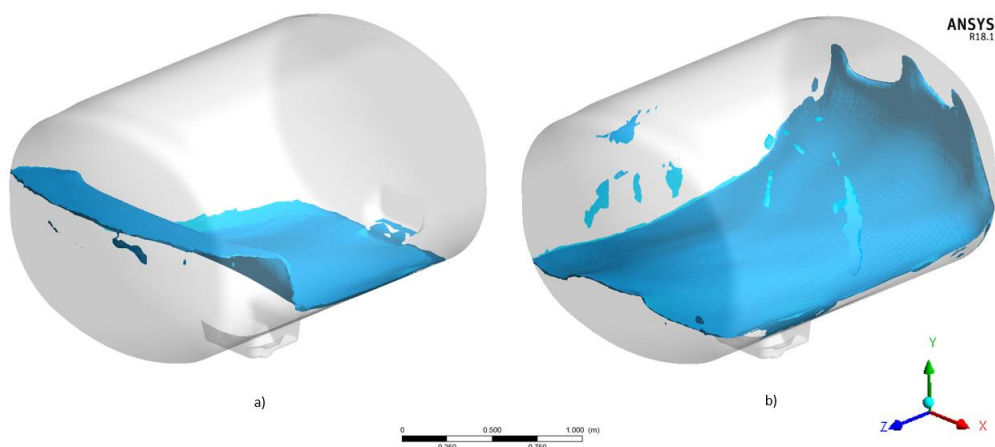


Figura 32 - Vistas em 3D do *sloshing* num reservatório de pulverizador preenchido com 25% de sua capacidade: (a) primeiro impacto na parede frontal; (b) primeiro impacto na parede traseira.

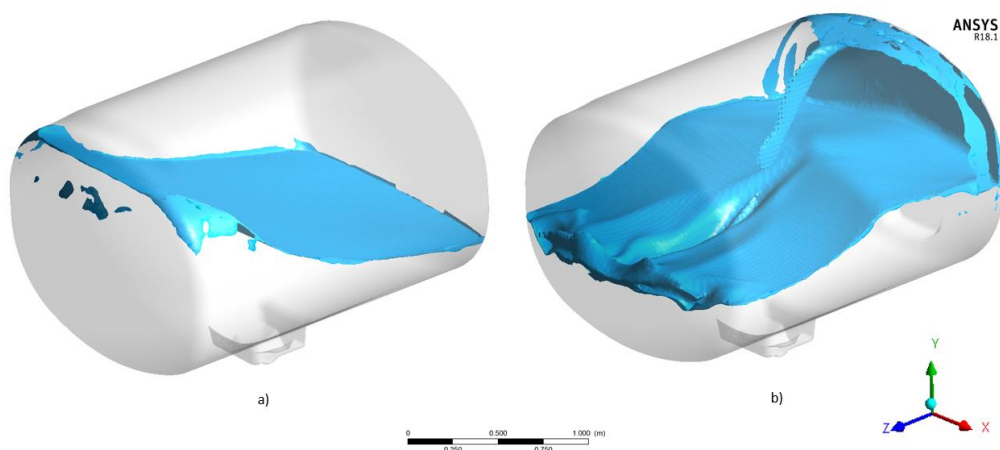


Figura 33 - Vistas em 3D do *sloshing* num reservatório de pulverizador preenchido com 50% de sua capacidade: (a) primeiro impacto na parede frontal; (b) primeiro impacto na parede traseira.

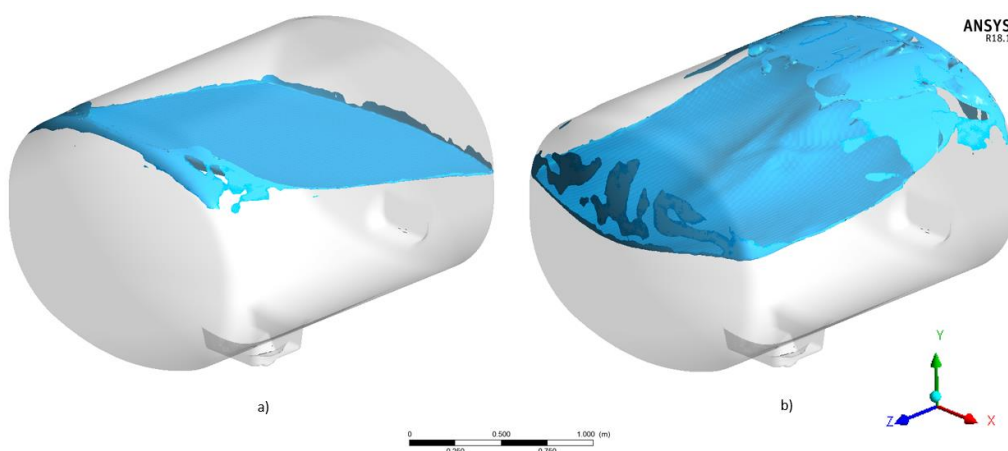


Figura 34 - Vistas em 3D do *sloshing* num reservatório de pulverizador preenchido com 75% de sua capacidade: (a) primeiro impacto na parede frontal; (b) primeiro impacto na parede traseira.

A Tabela 4 mostra a predição da pressão nos pontos indicados na Figura 23, para o reservatório sem defletores com os níveis de enchimento de 25%, 50% e 75%.

Pode-se observar que os picos de pressão para o reservatório com nível de enchimento de 75% são aproximadamente 64%, 69%, 32% e 26% maior que o nível de 50% nas posições P1, P2, P3 e P4, respectivamente. A variação de amplitude na Tabela 4 pode ser interpretada como a variação da pressão dinâmica nessas posições. No reservatório com nível 75%, os valores são aproximadamente 30% para P1 e 35% para P2 maiores que no nível 50%. Entretanto, para P3 e P4, as variações de amplitude no nível 50% são aproximadamente 10% e 8% maiores que no nível 75%, respectivamente. Ou seja, apesar dos picos de pressão para todos os pontos terem sido maiores para o nível 75%, os valores da variação de amplitude em P3 e P4 foram um pouco maiores para o nível 50%. Como citado anteriormente, interpretando essa variação como a variação da pressão dinâmica, os valores foram maiores devido a ter mais espaço vazio para a maior movimentação do fluido com nível 50% que no caso do nível 75%.

TABELA 4 – VALORES DE PRESSÃO PARA O RESERVATÓRIO SEM DEFLETORES

Ponto de Pressão	Condição	Nível 25%	Nível 50%	Nível 75%
P1	Pressão Mínima (Pa)	-1103	-1004	-481
	Pressão Máxima (Pa)	1410	2436	3986
	Variação de Amplitude (Pa)	2513	3440	4467
P2	Pressão Mínima (Pa)	-1103	-989	13
	Pressão Máxima (Pa)	1528	4049	6826
	Variação de Amplitude (Pa)	2631	5038	6813
P3	Pressão Mínima (Pa)	-34	2389	5814
	Pressão Máxima (Pa)	5614	8861	11684
	Variação de Amplitude (Pa)	5648	6472	5870
P4	Pressão Mínima (Pa)	2652	5341	8564
	Pressão Máxima (Pa)	7673	10871	13708
	Variação de Amplitude (Pa)	5020	5531	5144

A Figura 35 mostra as curvas de pressão na parede frontal do reservatório para as mesmas simulações. As curvas apresentam perfis similares para os pontos inferiores (P3 e P4) e algumas diferenças para os pontos superiores (P1 e P2). Isso pode ser atribuído ao fato de que P3 e P4 estão submersos para todos os níveis de enchimento do reservatório simulados e as diferenças dos valores de pressão são devidas às diferenças de colunas de

água sobre esses pontos. Por outro lado, para P1 e P2, há diferenças adicionais devidas à coincidência dos períodos das funções de pressão.

Pela observação dos resultados de pressão, é possível observar que a condição de enchimento de 75% para o reservatório sem defletores é a mais crítica para avaliar a influência dos arranjos propostos para diminuir os efeitos indesejáveis do *sloshing*.

A Figura 36 mostra a formação das ondas de *sloshing* devido à excitação imposta na direção do eixo z de acordo com a Fig. 24 no reservatório sem defletores com nível de 75%. Nas imagens mostradas, as isosuperfícies com fração volumétrica igual a 0,5 representam a superfície livre entre a água e o ar dentro do reservatório. Devido às forças de *sloshing*, a água dentro do mesmo se movimenta para ambos os lados, à medida que a interface água-ar se altera, como mostrado nos instantes 1,2 s e 2,2 s. Depois do primeiro impacto das ondas nas paredes frontal e traseira do reservatório, alguns picos de flutuação aparecem na interface ar-líquido, como pode ser visto no instante 2,8 s. No instante 3,1 s, ocorre um novo pico de pressão na parede frontal do reservatório com energia ligeiramente menor que no primeiro impacto. Isso é percebido porque a energia é acumulada durante a formação das ondas de *sloshing* e diminui depois dos impactos com as paredes do reservatório. Algumas flutuações ainda ocorrem e podem ser notadas na interface ar-líquido desde o instante 4,0 s até o instante 6,0 s, onde a superfície livre tende a se estabilizar com o consumo da energia do *sloshing* no final da simulação.

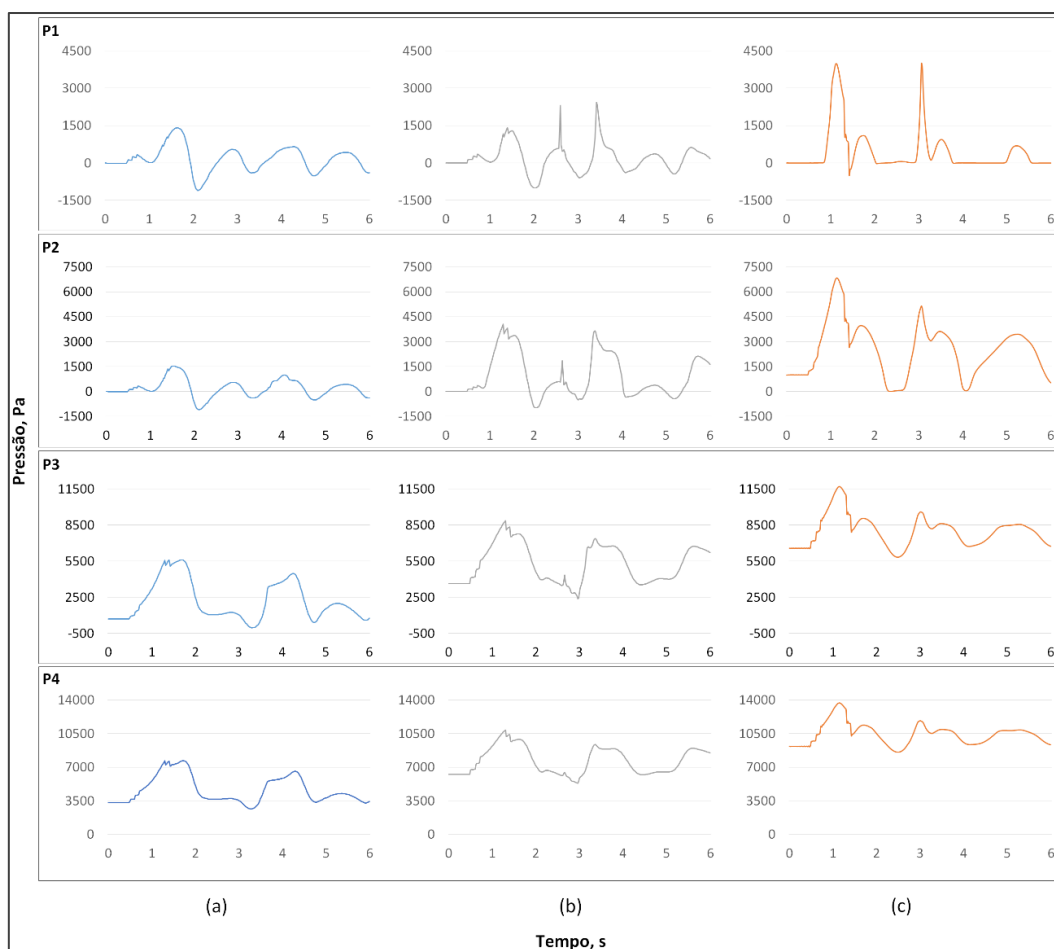


Figura 35 - Pressão no tempo na parede frontal do reservatório sem defletores para três diferentes níveis de enchimento: (a) 25%; (b) 50% e (c) 75%.

A Figura 37 mostra a distribuição de pressão sob as paredes do reservatório com nível de enchimento de 75%, nos mesmos instantes de simulação que ocorrem picos de pressão de acordo com as curvas mostradas na Fig. 35. Apesar da simetria do reservatório em relação ao eixo y e ao fato de que a aceleração aplicada aos mesmos é unidirecional (direção no eixo z) não é possível afirmar que seria viável a utilização de modelos bidimensionais para a redução dos esforços computacionais.

Outro ponto importante na análise é que as localizações dos pontos de captura de pressão indicados na Fig. 23 estão no centro da parede frontal do reservatório. Como mostrado na Fig. 37, há simetria no gradiente de pressão nas vistas frontais em ambos os instantes de simulação analisados, e há alterações nos valores de pressão principalmente na direção y . Portanto, é possível afirmar que os pontos de pressão escolhidos (P1, P2, P3 e P4) são suficientes para representar as cargas de *sloshing* na parede frontal do reservatório.

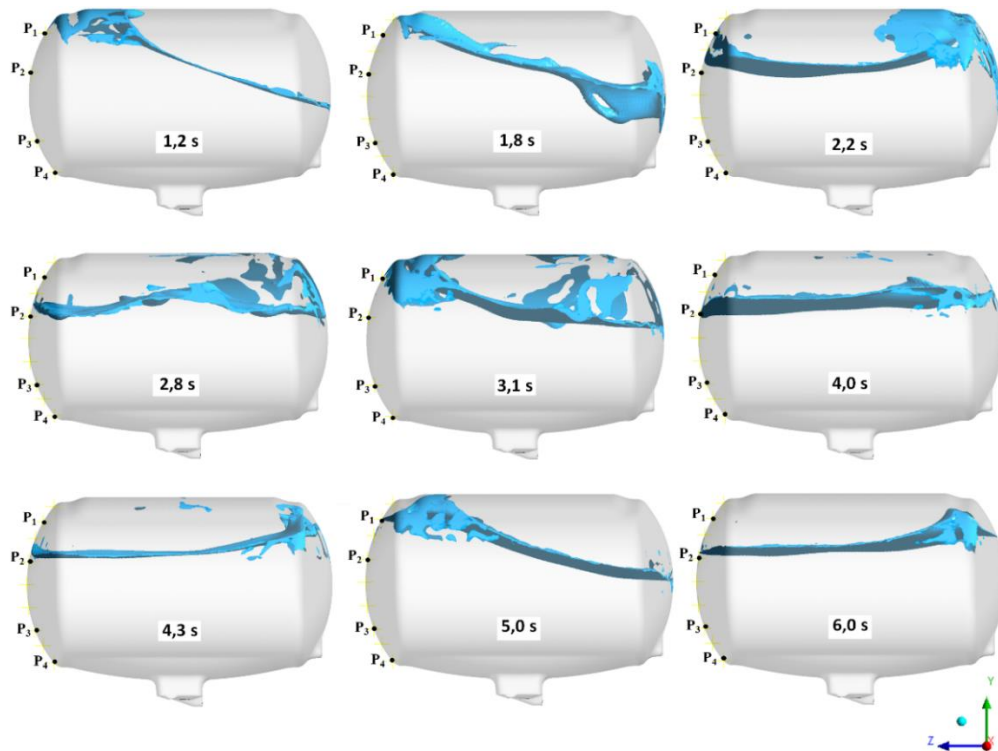


Figura 36 - Vistas em 2D das ondas de *sloshing* no reservatório com nível 75% sem defletores.

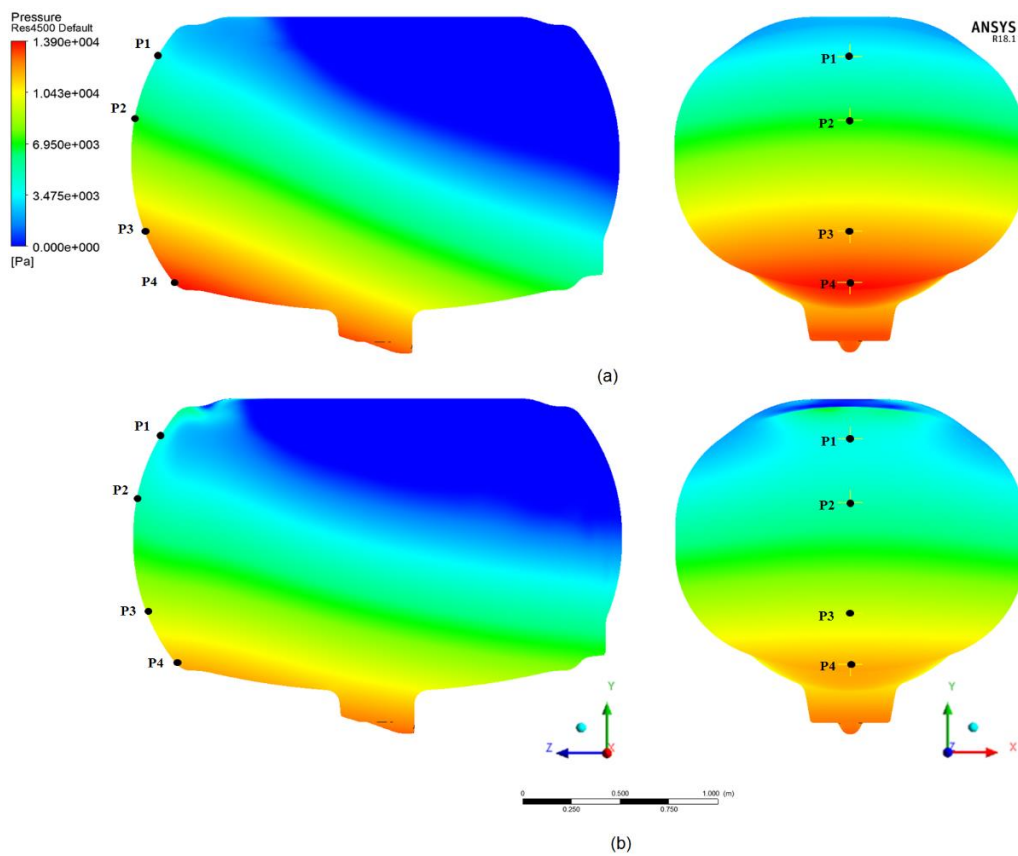


Figura 37 - Gradiente de pressão na parede do reservatório (vistas lateral e frontal) devido à aceleração na direção do eixo z nos seguintes instantes de simulação: (a) 1,2s; e (b) 3,1s.

A Figura 38 mostra os resultados de simulação da distribuição de pressão para os arranjos 1 e 2, nas mesmas posições na parede do reservatório indicados na Fig. 35, em comparação com os valores da distribuição de pressão no caso do reservatório sem defletores.

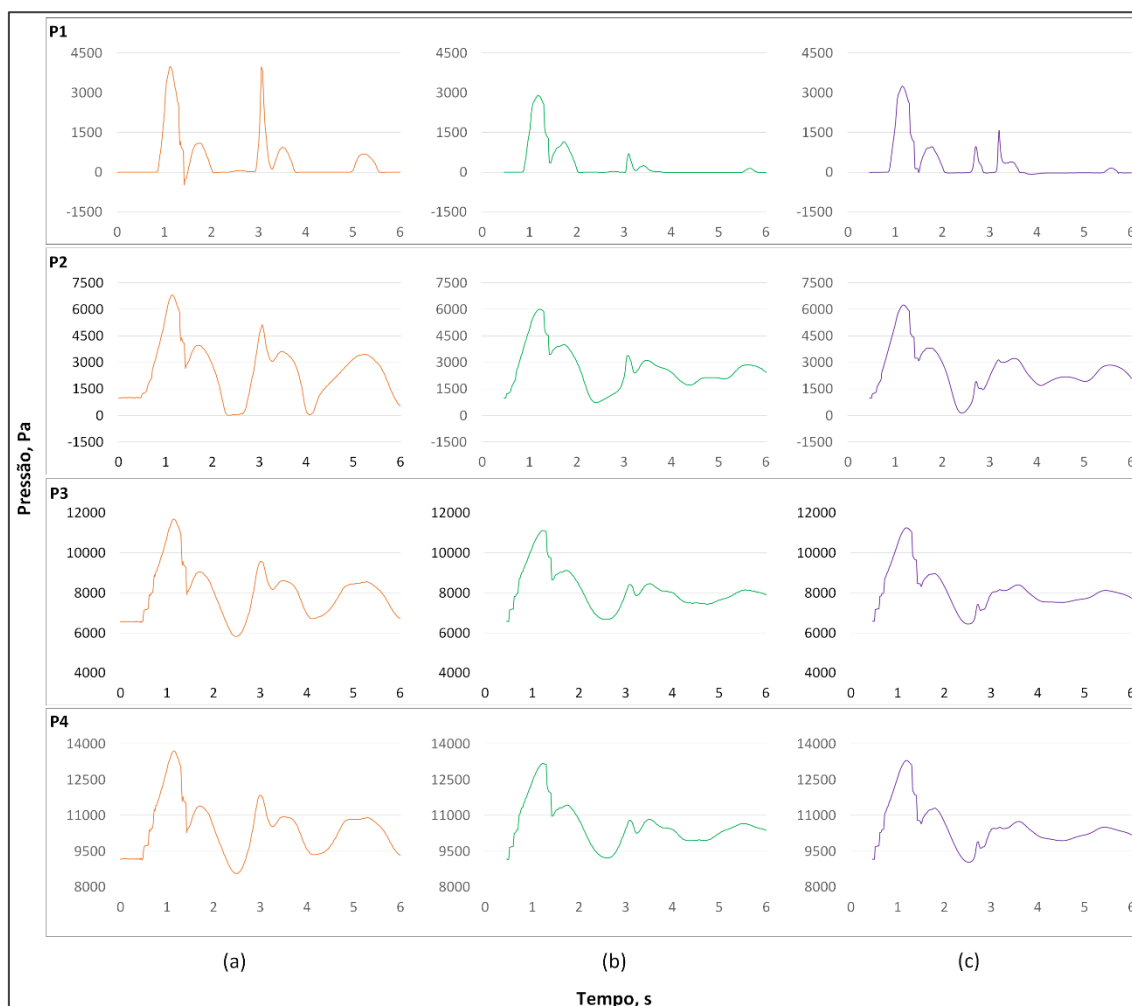


Figura 38 - Pressão no tempo na parede frontal do reservatório com nível 75%, nas seguintes condições: (a) sem defletores; (b) arranjo 1; e (c) arranjo 2.

A Tabela 5 mostra os resultados de simulação da pressão de impacto em alguns pontos na parede frontal do reservatório nas condições do mesmo sem defletores, com o arranjo 1 e com o arranjo 2, de acordo com o indicado na Fig. 38, para o nível de enchimento de 75%. Pode ser observado que os picos de pressão e as variações de amplitude para ambos os arranjos são menores que aqueles encontrados no modelo sem defletores. Os valores de pressão máxima para o arranjo 1 foram menores que o caso sem defletores em aproximadamente 38% para P1 e 4% para P4. Com relação à comparação

da variação de amplitude, esse arranjo promove uma redução de aproximadamente 53% para P1 e 29% para os demais pontos de pressão. Para o arranjo 2, os picos de pressão diminuíram em torno de 23% para P1 e 3% para P4, e a variação de amplitude reduziu 35% para P1 e 21% para P4. Os resultados ilustraram a eficiência de dois arranjos com o uso de defletores verticais para mitigar as pressões de impacto e alterar o comportamento das ondas de *sloshing*.

TABELA 5 – VALORES DE PRESSÃO PARA O RESERVATÓRIO COM OS ARRANJOS PROPOSTOS

Ponto de Pressão	Condição	Sem defletores	Arranjo 1		Arranjo 2	
P1	Pressão Mínima (Pa)	-481	-19		-70	
	Pressão Máxima (Pa)	3986	2897	-38%	3249	-23%
	Variação de Amplitude (Pa)	4467	2916	-53%	3318	-35%
P2	Pressão Mínima (Pa)	13	734		137	
	Pressão Máxima (Pa)	6826	6014	-14%	6247	-9%
	Variação de Amplitude (Pa)	6813	5280	-29%	6110	-12%
P3	Pressão Mínima (Pa)	5814	6568		6436	
	Pressão Máxima (Pa)	11684	11117	-5%	11261	-4%
	Variação de Amplitude (Pa)	5870	4549	-29%	4826	-22%
P4	Pressão Mínima (Pa)	8564	9152		9039	
	Pressão Máxima (Pa)	13708	13178	-4%	13299	-3%
	Variação de Amplitude (Pa)	5144	4026	-28%	4260	-21%

Com uma solução similar aos arranjos apresentados nesse trabalho, Joshi et al. (2017) analisaram a estabilidade de um navio, modelando a geração e propagação da superfície livre das ondas num reservatório com um arranjo de defletores verticais montados no fundo do mesmo. Nesse caso, o uso dos defletores promoveu reduções da pressão de impacto máxima entre 15% e 50%, para o nível de enchimento do reservatório de 80%.

As Figuras 39 e 40 mostram o perfil das ondas de *sloshing* formadas durante o mesmo período de simulação para os arranjos 1 e 2, respectivamente. Comparando essas figuras, pode-se observar que ocorre a redução da formação de saltos hidráulicos e impactos do fluido contra o teto do reservatório em ambos os arranjos propostos.

A figura 41 mostra o perfil das ondas de *sloshing* no reservatório com nível de 75% com os arranjos 1 e 2, nos instantes de picos de pressão de acordo com a Fig. 38. Comparando os dois arranjos para o instante de simulação igual a 1,2 s (Fig. 41a), a elevação das ondas de *sloshing* é similar para ambos. Entretanto, para o instante de

simulação igual a 3,1 s (Fig. 41b), a formação de um salto hidráulico no arranjo 2 pode ser observada, e a elevação do *sloshing* é menor no reservatório com o arranjo 1.

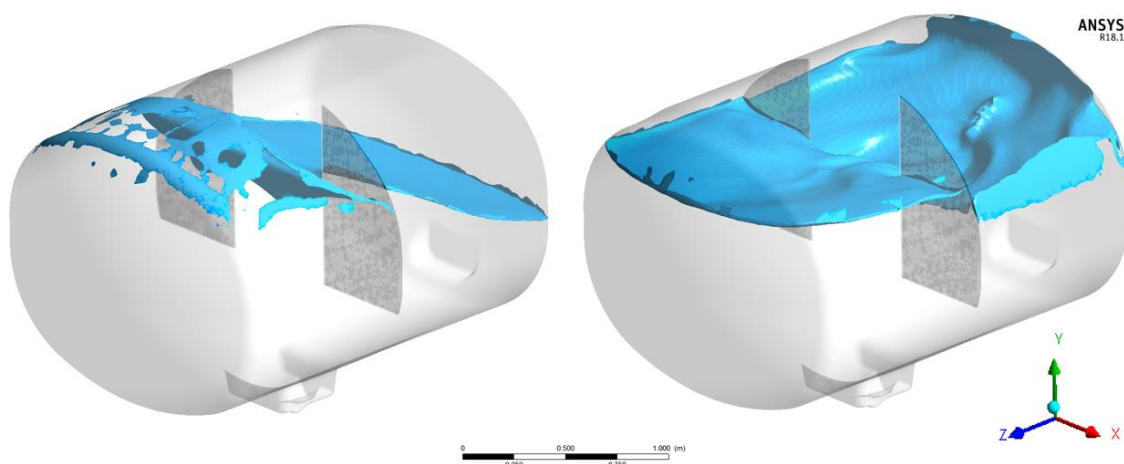


Figura 39 - Vistas em 3D do *sloshing* num reservatório de pulverizador preenchido com 75% de sua capacidade configurado com o arranjo 1.

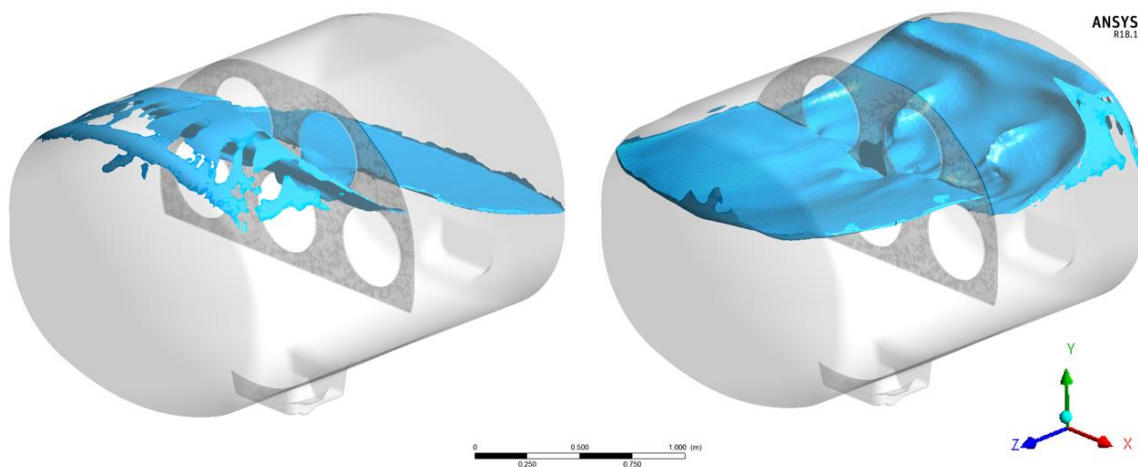


Figura 40 - Vistas em 3D do *sloshing* num reservatório de pulverizador preenchido com 75% de sua capacidade configurado com o arranjo 2.

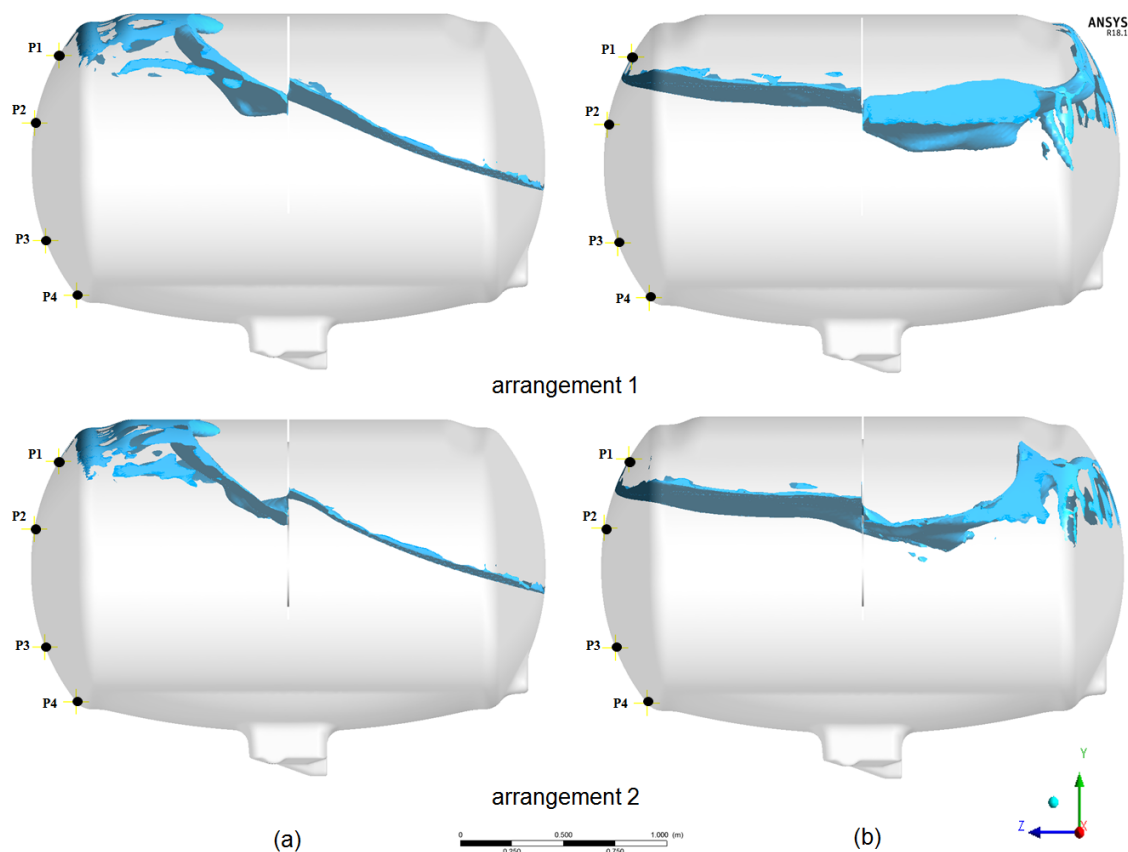


Figura 41 - Vistas em 2D do *sloshing* no reservatório do pulverizador com os arranjos 1 e 2: (a) instante = 1,2s e (b) instante = 3,1s.

A Figura 42 mostra os perfis de pressão na parede do reservatório com nível de enchimento de 75% com o arranjo 1 nos mesmos instantes de simulação apresentados na Fig. 41, enquanto a Fig. 43 mostra os perfis de pressão para o arranjo 2. Como analisado anteriormente no caso do reservatório sem defletores no mesmo nível de enchimento, a comparação dos gradientes de pressão mostra que as posições dos pontos de pressão indicadas na Fig. 23 são adequadas para analisar as cargas de impacto sob a parede frontal do reservatório.

Para verificar as distribuições de pressão nas paredes dos defletores, alguns pontos foram adicionados e suas localizações estão indicadas na Fig. 44. A Figura 45 mostra os gradientes de pressão sob os defletores para ambos os arranjos, e a Fig. 46 mostra a pressão no tempo para comparação dos mesmos. Como é percebido na Fig. 45, há gradientes de pressão similares nas superfícies dos defletores para os dois arranjos. No entanto, os primeiros picos de pressão para o reservatório com arranjo 1 são maiores que

no caso do arranjo 2 para os pontos P6, P7 e P8, como mostrado na Fig. 46. Pode-se perceber também que os valores de variação de amplitude da pressão para o arranjo 1 são maiores que o arranjo 2 para todos os pontos. Então, analisando os valores de pressão nas paredes dos defletores, o defletor perfurado apresenta resultados um pouco melhores que o defletor parcial com um vão no centro do mesmo. As curvas de pressão nos pontos P5 a P8 apresentam comportamentos similares para cada ponto em ambos os arranjos depois do instante 4.0 s, e isso pode ser atribuído ao consumo de energia do *sloshing*.

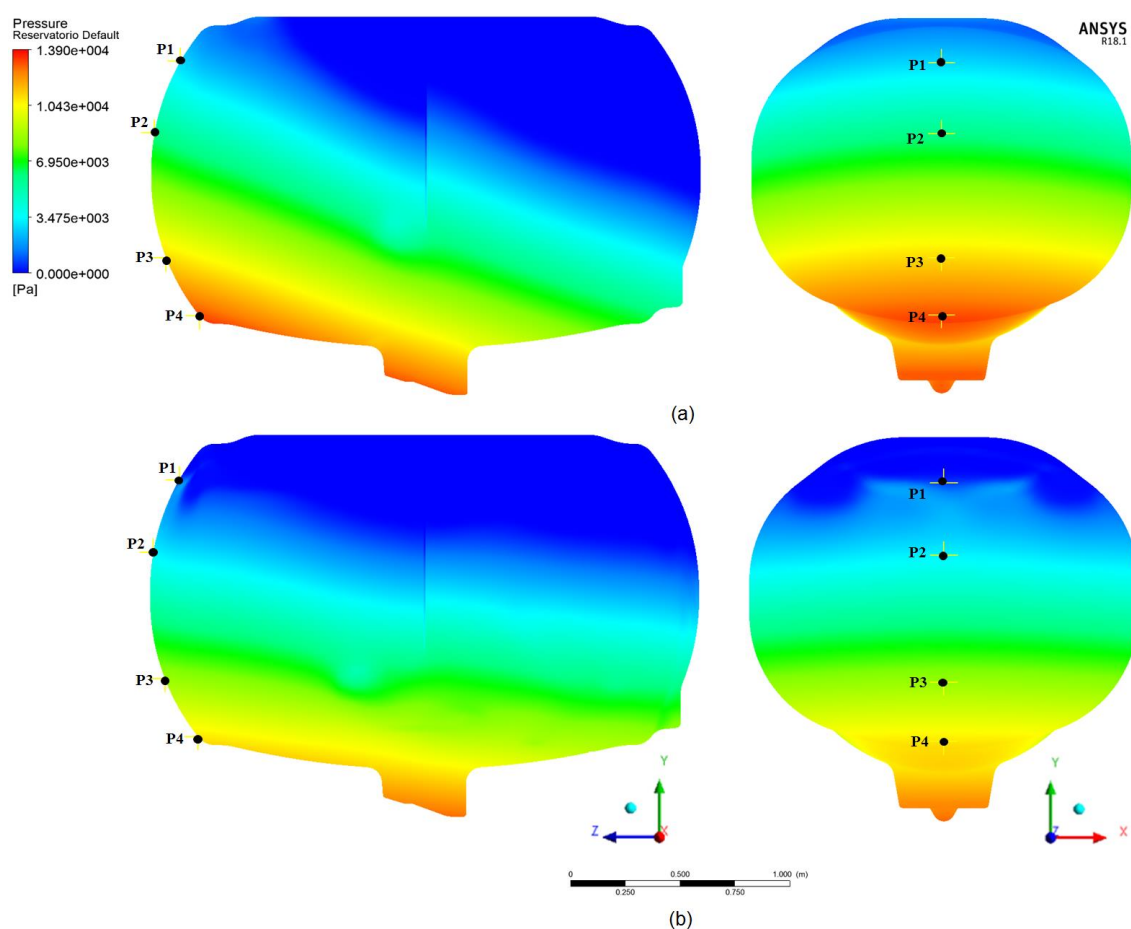


Figura 42 - Gradiente de pressão na parede do reservatório (vistas lateral e frontal) para o arranjo 1 nas condições: (a) instante = 1,2s; (b) instante = 3,1s.

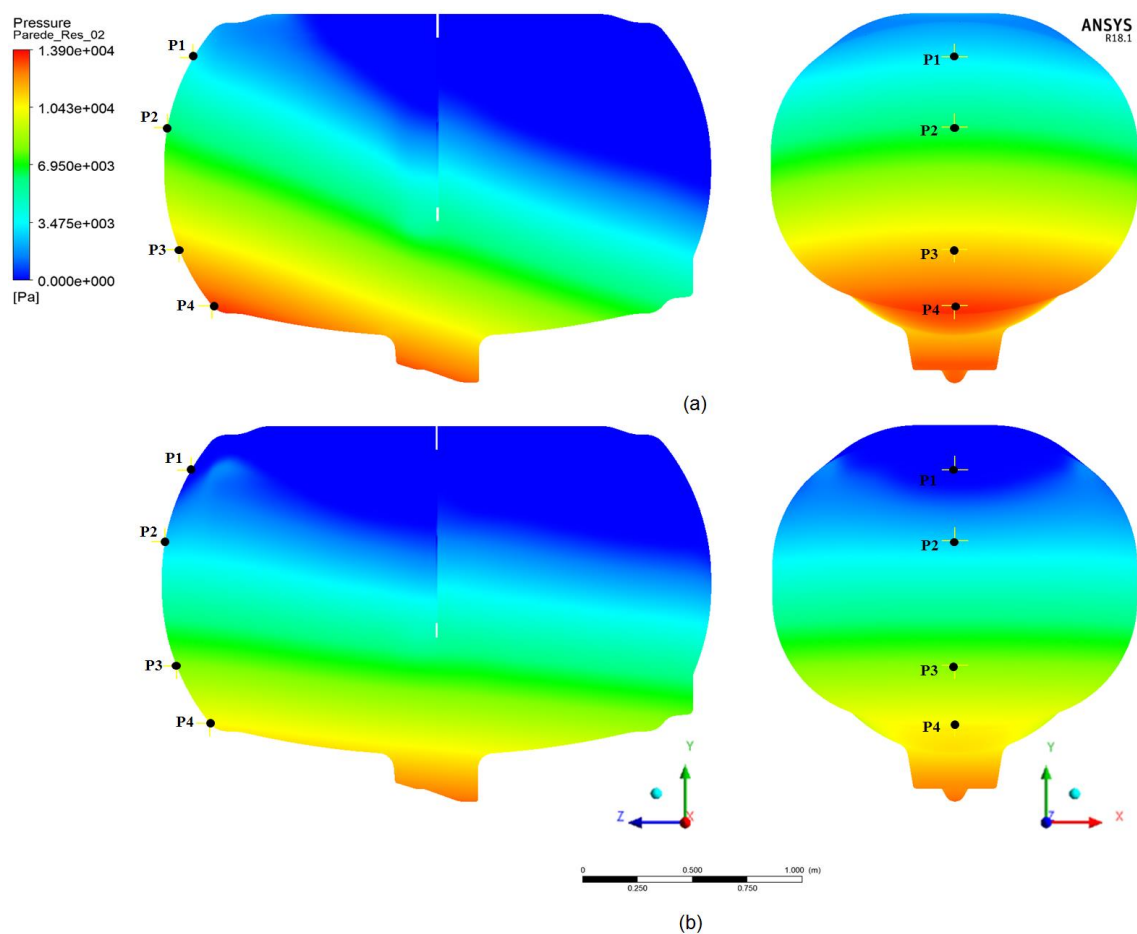


Figura 43 - Gradiente de pressão na parede do reservatório (vistas lateral e frontal) para o arranjo 2 nas condições: (a) instante = 1,2s; (b) instante = 3,1s.

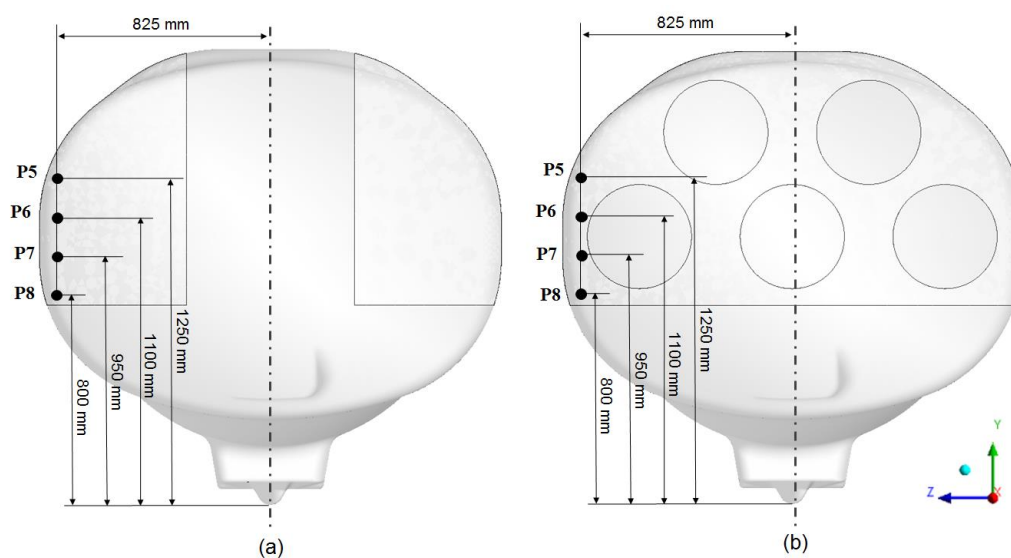


Figura 44 - Posições dos pontos de pressão para as paredes dos defletores: (a) arranjo 1; (b) arranjo 2.

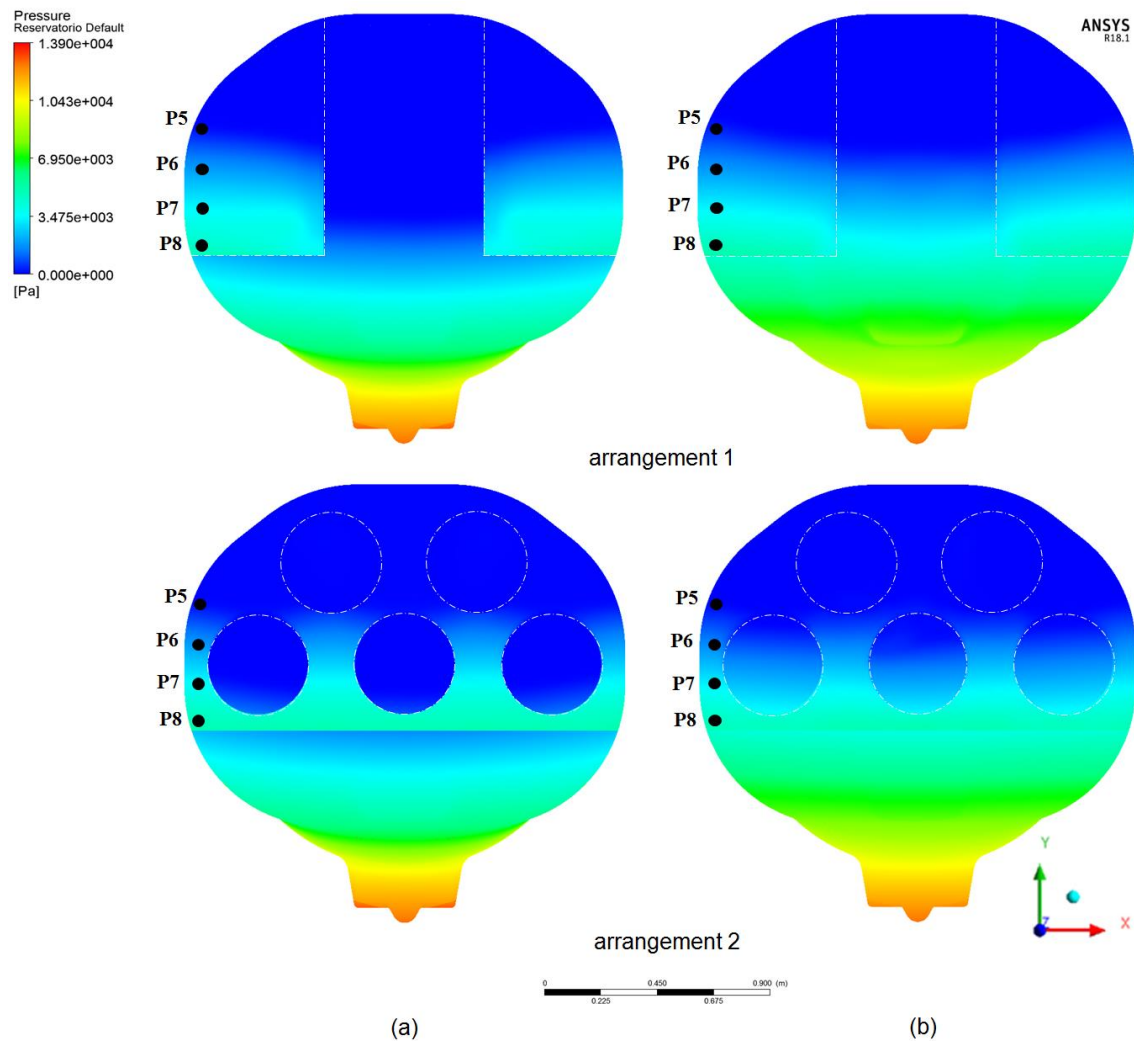


Figura 45 - Gradientes de pressão nas paredes dos defletores para os arranjos 1 e 2 nas condições: (a) instante = 1,2s; (b) instante = 3,1s.

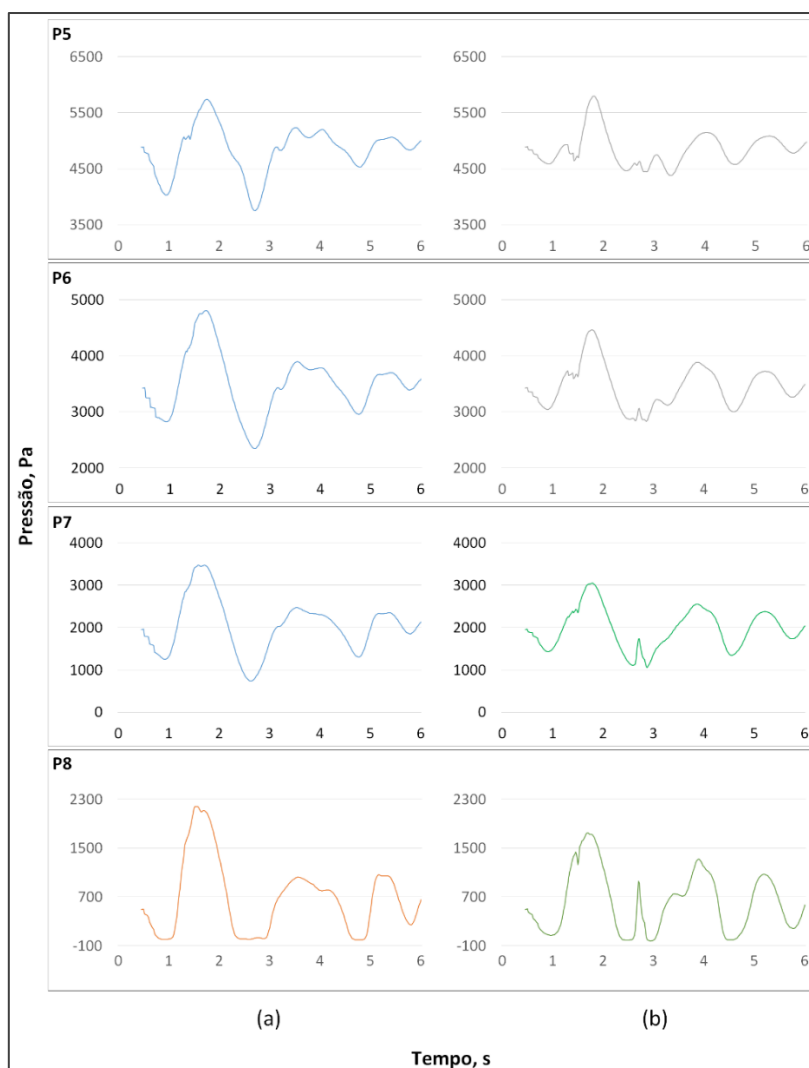


Figura 46 - Pressão no tempo na parede dos defletores do reservatório com nível 75%, nas seguintes condições: (a) arranjo 1; e (b) arranjo 2.

5.4 Resultados dos modelos em regime permanente

5.4.1 Análise dos perfis de velocidades no escoamento

Como resultado da simulação numérica, é possível visualizar os perfis de velocidades ao longo do reservatório, para caracterizar o escoamento durante a agitação no interior do mesmo.

A Figura 47 mostra as posições dos planos de corte para a análise dos perfis de velocidades durante a agitação do reservatório. Os perfis de velocidades dos planos de

corte longitudinais são mostrados na Figura 48, e dos planos de corte transversais na Figura 49.

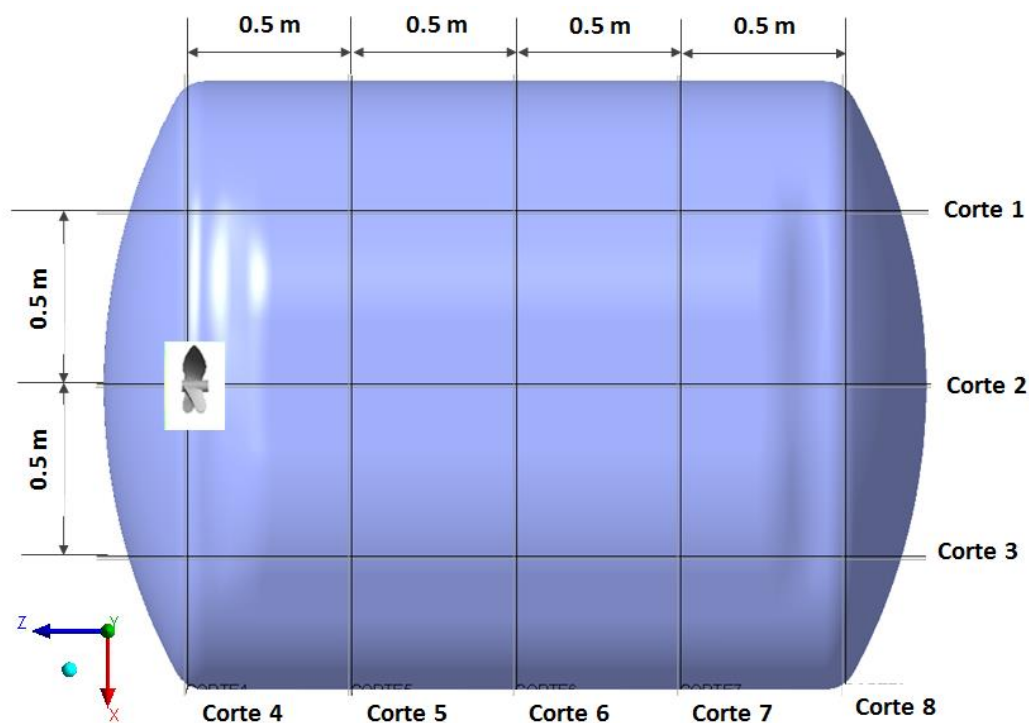


Figura 47 – Vista superior do reservatório com a indicação das posições dos planos de corte.

Outra forma de avaliar o comportamento da agitação é a utilização de uma isosuperfície, discutida anteriormente no capítulo 3, e mostrada na Figura 50, para as configurações do reservatório sem defletores, e com os arranjos 1 e 2. Nessa representação, a superfície indicada corresponde a todos os elementos que possuem como velocidade média resultante o valor previamente definido, que neste caso foi de 0,3 m/s.

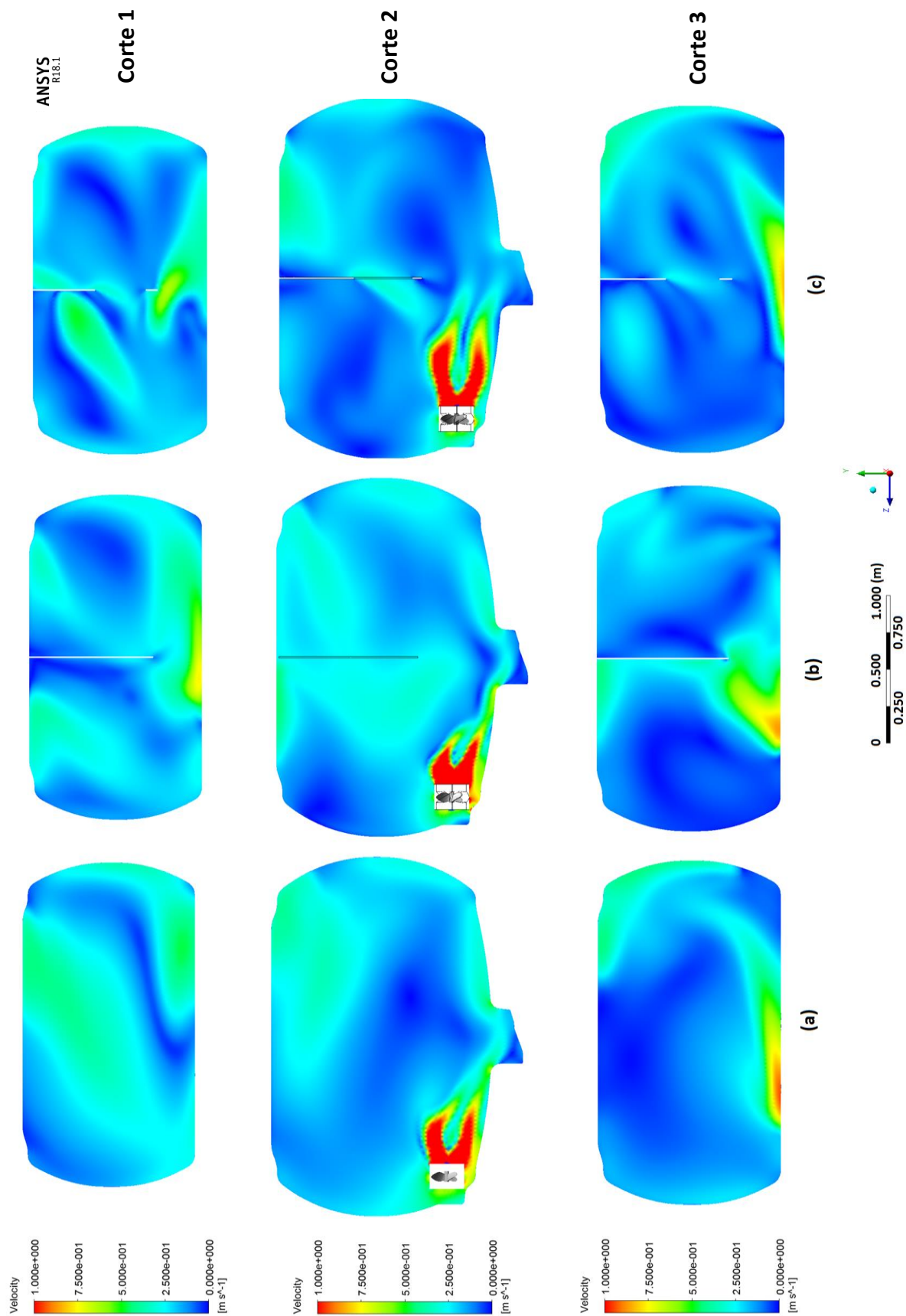


Figura 48 - Vistas dos perfis de velocidades nos planos de corte longitudinais nas configurações: (a) sem defletores; (b) arranjo 1; e (c) arranjo 2.

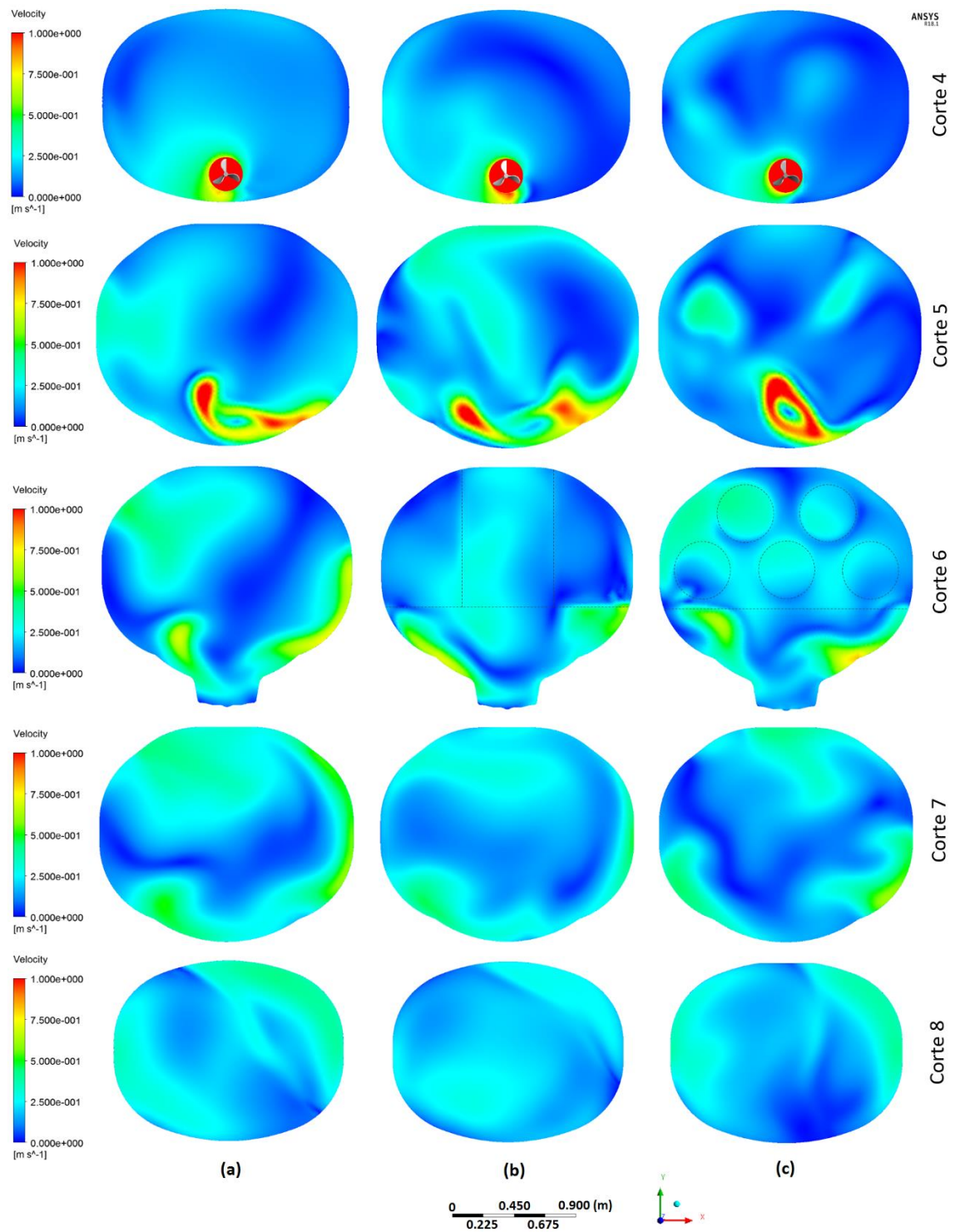


Figura 49 - Vistas dos perfis de velocidades nos planos de corte transversais nas configurações: (a) sem defletores; (b) arranjo 1; e (c) arranjo 2.

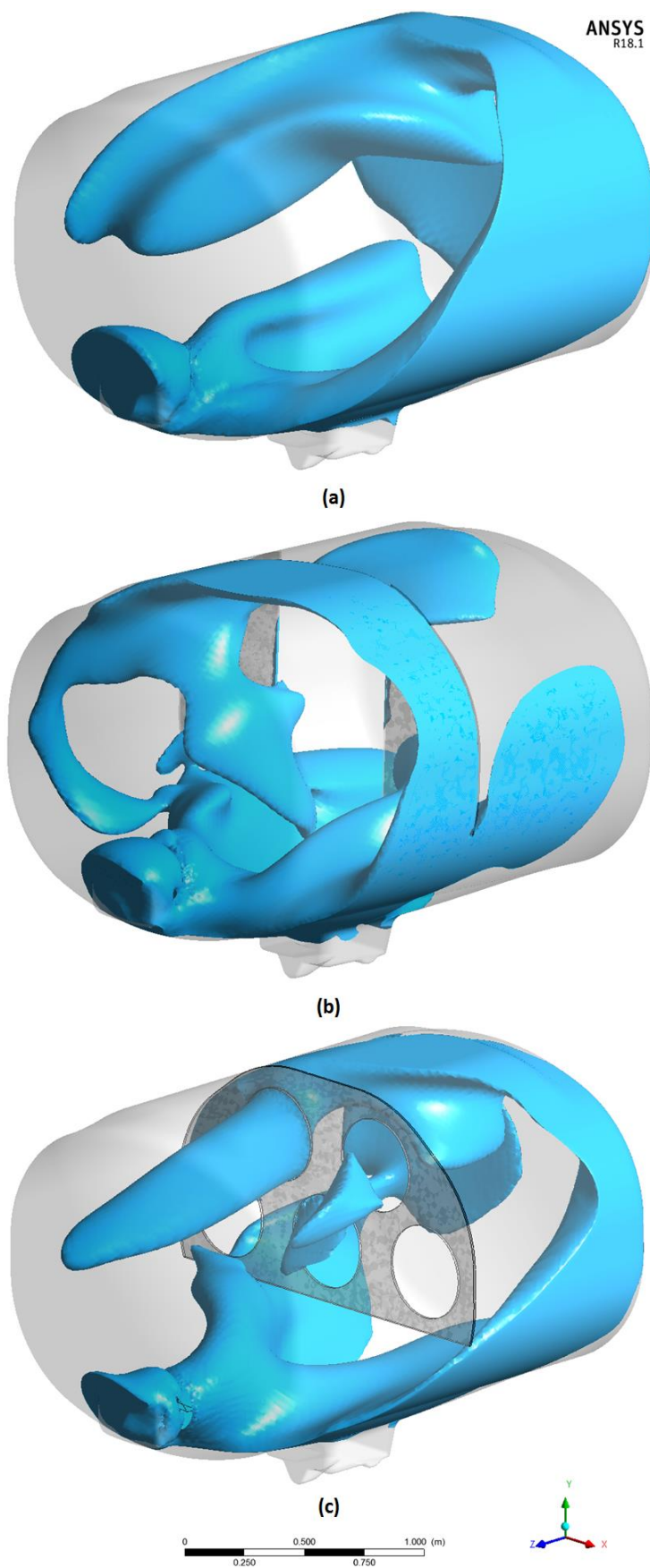


Figura 50 – Isosuperfícies com módulo de velocidade igual a 0,3m/s nas configurações: (a) sem defletores; (b) arranjo 1; e (c) arranjo 2.

As Figuras 48 e 49 mostram a influência do agitador mecânico nos perfis de velocidades ao longo do volume do reservatório. Isso também pode ser visualizado na isosuperfície da Fig. 50, onde as velocidades nas regiões fora da isosuperfície são inferiores a 0,3m/s. O agitador mecânico é responsável pela agitação do reservatório, garantindo maior gradiente de velocidade em toda a região no fundo do mesmo. Porém, ele não é capaz de contribuir da mesma forma na direção longitudinal do reservatório, dependendo da configuração de defletores utilizada, além da sua característica construtiva e da posição de instalação do mesmo.

A Figura 51 mostra uma representação vetorial do fluido em agitação devido à influência do agitador mecânico no plano de corte 2 da Figura 47, para as configurações do reservatório sem defletores, e com os arranjos 1 e 2. É possível identificar regiões de sucção do agitador, com velocidades inferiores a 1m/s (regiões radial e traseira da hélice), e de recalque, com velocidades superiores a 1 m/s (região frontal da hélice). A configuração sem defletores apresenta regiões de recirculação do fluido com baixas velocidades no centro do reservatório, como mostrado na Figura 51a. Ambas as configurações sem defletores e com o arranjo 1 apresentam velocidades mais altas próximas à parede inferior do mesmo que na configuração com o arranjo 2. Pode-se perceber também que com o arranjo 1, há uma redução da região com recirculação no centro do reservatório, pois com o *gap* entre as paredes do defletor desse arranjo a redução de área de passagem causa o aumento de velocidade naquela região, como mostrado na Figura 51b. Isso também pode ser notado na Figura 51c, com o arranjo 2, na região onde há a linha de furos da parede do defletor adotado no mesmo. O arranjo 1 também apresenta uma diferença na formação do fluxo do agitador mecânico que nas outras configurações, provavelmente devido às duas superfícies do defletor não possuírem nenhum furo ou alívio, e isso influencia o direcionamento do escoamento para a região inferior do reservatório.

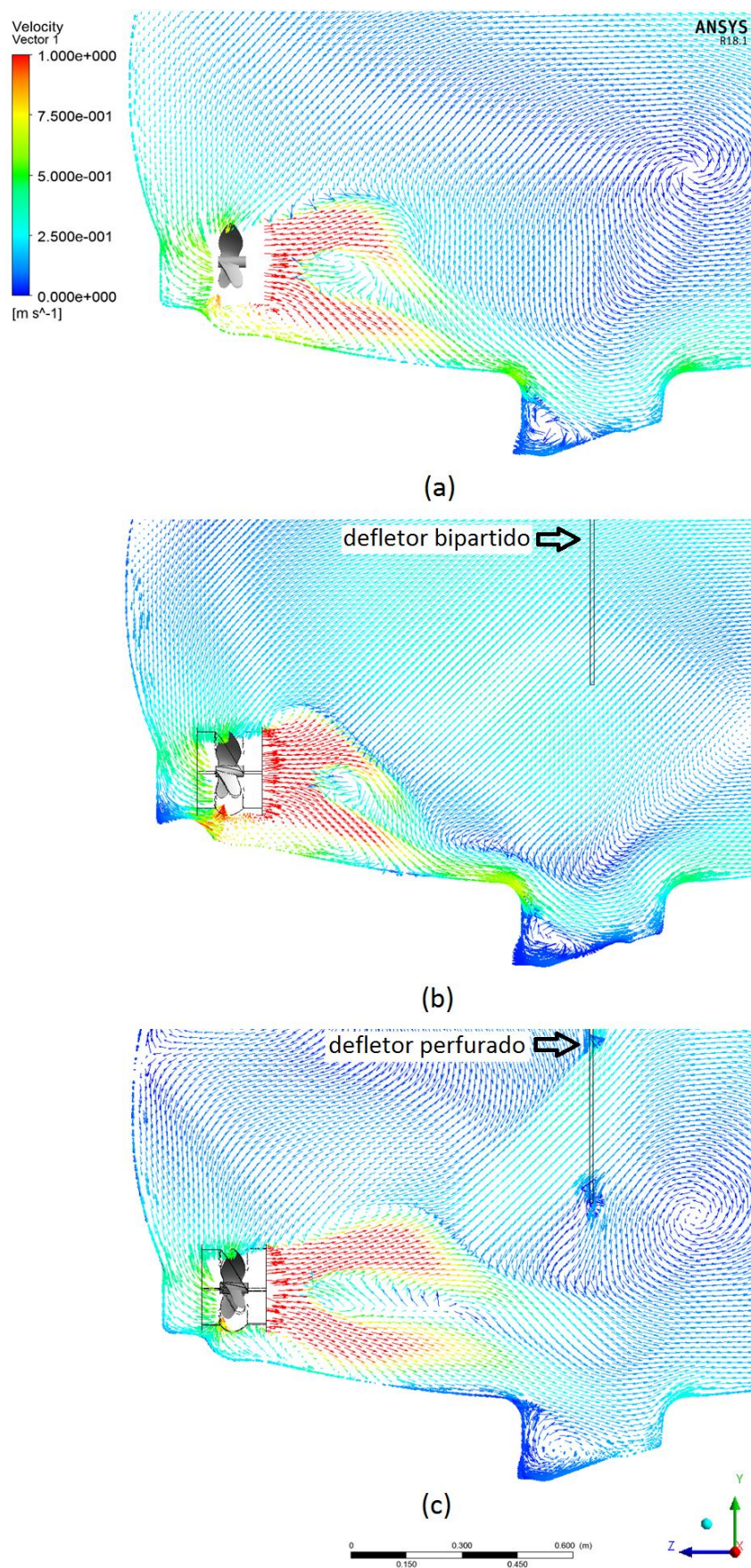


Figura 51 - Representação vetorial dos perfis de velocidades da agitação mecânica nas configurações: (a) sem defletores; (b) arranjo 1; e (c) arranjo 2.

5.4.2 Análise da tensão de cisalhamento na parede do reservatório

Uma adequada mistura de herbicidas para aplicação em um reservatório de um pulverizador agrícola é muito importante para garantir a uniformidade da pulverização em todo o campo, e é um requisito para o projeto dos reservatórios nesse tipo de equipamento. El-Nahhal e Hamdona (2017) e Sousa et al. (2018) investigaram o uso de herbicidas para o controle de ervas daninhas e a inibição de crescimento (fitotoxicidade) para as culturas de milho e soja devido à contaminação de produtos de tratamentos anteriores realizados. A correta aplicação de herbicidas depende de vários fatores, incluindo a dosagem utilizada, a contaminação de resíduos de aplicações anteriores depositados no fundo dos reservatórios de pulverizadores, e da agitação contínua para obter homogeneidade da mistura.

Como apresentado no Capítulo 3, regiões com baixos valores de tensão de cisalhamento correspondem a regiões mais sujeitas a ocorrer deposição de resíduos, principalmente na parede inferior do reservatório. Para manter uma boa agitação da mistura sem a necessidade da inclusão de mais agitadores, evitando aumentar os custos do projeto, o requisito é alcançar valores de tensão de cisalhamento maiores que 0,3 Pa.

Antes de avaliar a tensão de cisalhamento na parede do reservatório é necessário avaliar os valores do adimensional Y_{plus} em toda a parede do mesmo para garantir que os resultados próximos à parede sejam válidos. Pode-se observar na Figura 52, que os valores do Y_{plus} ficaram abaixo do limite para o modelo de turbulência escolhido (nesse trabalho, o Y_{plus} não deveria ser maior que 300, já que foi utilizado o modelo de turbulência k-epsilon). Segundo a Equação 8, quanto maior o valor da velocidade tangencial à parede, maior o valor do Y_{plus} , para uma mesma distância da parede.

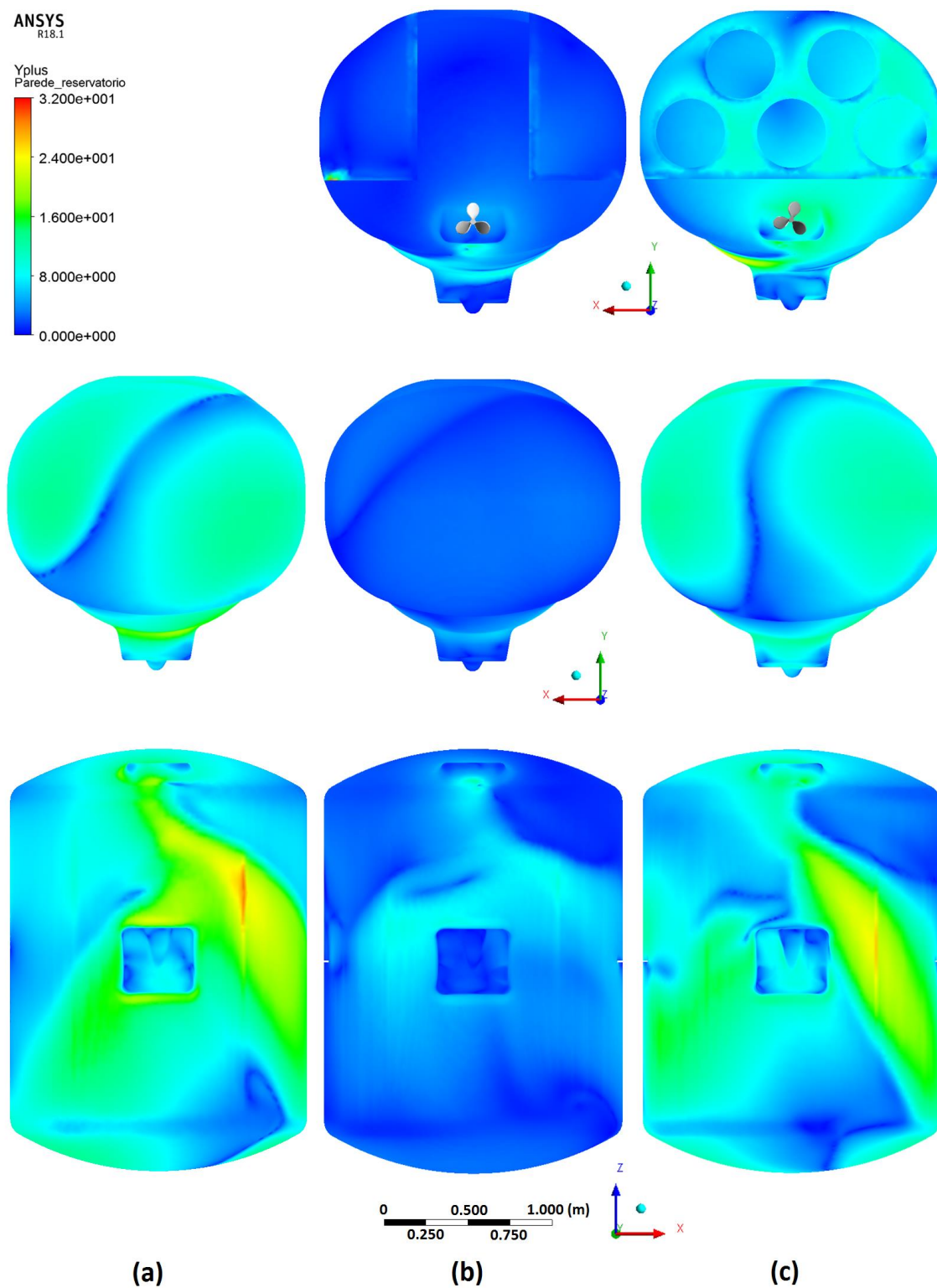


Figura 52 – Valores do Y_{plus} na parede dos defletores, e nas paredes frontal e inferior do reservatório nas configurações: (a) sem defletores; (b) arranjo 1; e (c) arranjo 2.

Após a análise e discussão da eficiência e performance hidrodinâmica dos arranjos propostos para reduzir os efeitos de *sloshing* na parede do reservatório, é igualmente

importante analisar os resultados para a tensão de cisalhamento na parede do mesmo, comparando-os nas condições: sem defletores verticais, com os arranjos 1 e 2 propostos. Foram utilizados modelos monofásicos em regime permanente considerando o nível totalmente cheio do reservatório como descrito no Capítulo 4.

A Figura 53 mostra os perfis de tensão de cisalhamento na parede inferior do reservatório para as três condições, com a consideração de agitação promovida pelo agitador mecânico.

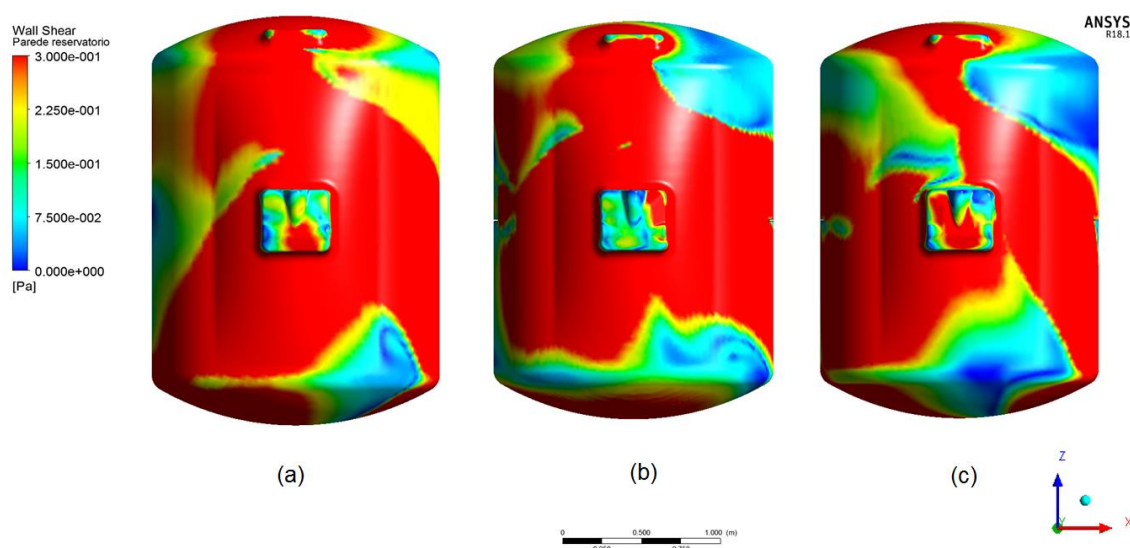


Figura 53 – Tensão de cisalhamento na parede inferior do reservatório nas seguintes condições: (a) sem defletores; (b) arranjo 1; e (c) arranjo 2.

Da comparação dos resultados, a porcentagem da área inferior da parede do reservatório onde a tensão de cisalhamento é menor que 0,3 Pa (abaixo do requisito) é 26%, 24% e 36% para os casos sem defletores, com o arranjo 1 e com o arranjo 2, respectivamente. No caso do arranjo 2, que é um defletor vertical parcial perfurado com cinco orifícios, reduz-se os efeitos de *sloshing*, mas não se torna adequado para manter o nível original de agitação mecânica dentro do reservatório. Nesse caso, o aumento da área abaixo do requisito de tensão de cisalhamento foi de 38,5% em relação ao reservatório sem defletores. Por outro lado, no caso do arranjo 1 houve uma redução da área da parede abaixo do requisito em 7,7%. Portanto, o arranjo 1 se mostra a solução mais otimizada que atende tanto o requisito de reduzir as pressões de impacto na parede do reservatório como o de manter, e até melhorar a condição original de agitação do mesmo.

CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusões

Neste estudo, foram desenvolvidos modelos numéricos para a predição dos movimentos de *sloshing* em um reservatório de um pulverizador agrícola. O método de simulação numérica permitiu a inclusão dos efeitos não lineares presentes na formação de *sloshing* e extrair as informações sobre os esforços atuantes nas paredes do reservatório. Através da comparação dos resultados obtidos, foi possível concluir que:

- As localizações dos pontos de pressão em regiões submersas e em regiões onde as ondas de *sloshing* atingem a parte superior do reservatório ajudaram a identificar que o caso de enchimento mais alto avaliado (75%) é o que gera maiores valores de pressão na parede do reservatório, e representa um maior impacto estrutural para o mesmo;
- Foi observado também que mesmo com o nível mínimo de enchimento estudado (25%), há registro de pressão na parede frontal no reservatório no ponto mais alto analisado;
- Com a instalação de defletores verticais como nos dois modelos de arranjos, as instabilidades devido ao *sloshing* são substancialmente reduzidas juntamente com a redução dos valores de pressão de impacto na parede do reservatório. Um gradiente de pressão similar também pode ser notado nas superfícies das paredes dos defletores para ambos os arranjos;
- O arranjo 1, com dois defletores verticais parciais e um vão central entre eles, foi o arranjo mais efetivo, proporcionando uma alta redução da pressão de impacto na parede (aproximadamente 38% para a pressão de pico no ponto mais alto avaliado e 29% na variação de amplitude para os pontos mais baixos), e reduziu os saltos hidráulicos e impactos do fluido na superfície superior do reservatório;

- O arranjo 2 também alcançou bons resultados, com redução em torno de 23% na pressão máxima no ponto mais alto da parede e 22% na variação de amplitude da pressão nos pontos mais baixos;
- Para a avaliação da influência na agitação da calda devido aos dispositivos para redução do *sloshing* propostos, foram desenvolvidos os modelos monofásicos (água) em regime permanente com agitação mecânica, considerando o nível de enchimento completo do reservatório. Analisando os resultados de tensão de cisalhamento na parede inferior do reservatório para todos os casos, o arranjo 1 foi o que manteve o mesmo nível de agitação mecânica do reservatório sem defletores e ao mesmo tempo reduziu os efeitos indesejáveis do *sloshing*;
- Com o arranjo 2, a área abaixo do requisito de tensão de cisalhamento foi maior em relação ao reservatório sem defletores, tornando-se inadequado como solução para o problema apresentado;
- A simulação através do modelo multifásico homogêneo é viável para avaliar os efeitos do *sloshing* em reservatórios de pulverizadores agrícolas, e permite avaliar o comportamento das ondas e demais instabilidades não lineares envolvidas nesse fenômeno.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Durante a realização deste trabalho, surgiram algumas ideias para futuros estudos, que poderiam ser implementados como uma extensão dessa pesquisa desenvolvida. As ideias mais adequadas são apresentadas a seguir:

- Estudo utilizando outros modelos de turbulência como o SST (*Shear Stress Transport*), *Realizable k- ϵ* e RNG k- ϵ ;
- Estudo do comportamento de *sloshing* considerando as excitações em outras condições de manobras, como o equipamento realizando curvas, e os movimentos bruscos de desvio para evitar acidentes (*lane change*);

- Estudo de dirigibilidade e conforto do operador do pulverizador devido à influência do *sloshing* como fonte de excitação externa, gerando instabilidades dinâmicas ao veículo;
- Estudo acoplado de CFD e análise estrutural para definição de espessura de parede de reservatórios e materiais para otimização de projetos.

Espera-se que todos os resultados apresentados nesta tese possam fornecer subsídios para exploração e investigação mais aprofundada da pesquisa de mitigação dos efeitos de *sloshing* em reservatórios.

6.3 Publicações originadas a partir do presente trabalho

Micheli, G.B., Fogal, M.L.F., Scalon, V.L., Padilha, A. “CFD analysis for the sloshing phenomena of spray mixture tank”. 25th ABCM International Congress of Mechanical Engineering, October 20-25, 2019, Uberlândia-MG, Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akyildiz, H., Erdem Ünal, N., 2006. “Sloshing in a three-dimensional rectangular tank: Numerical simulation and experimental validation”. *Ocean Engineering* 33 (16), 2135–2149.
- ANSYS®, 2017. Theory Guide, Release 18.1. ANSYS Inc., Canonsburg, EUA.
- ANSYS®, 2017. ANSYS ICEM CFD Help Manual, Release 18.1. ANSYS Inc., Canonsburg, EUA.
- Bellezi, C.A., Cheng, L.-Y., Okada, T., Arai, M., 2019. “Optimized perforated bulkhead for sloshing mitigation and control”. *Ocean Engineering* 187, 106171.
- Bird, R. B., Stewart, W. E. & Lightfoot, E. N., 2002. “Transport Phenomena” (2nd ed.), John Wiley & Sons, pp. 12-13.
- Brackbill, J.U, Kothe, D.B. and Zemach, C., 1992. “A Continuum Method for Modelling Surface Tension”, *Journal of Computational Physics* 100, 335-354.
- Canal Rural. Disponível em: <<https://blogs.canalrural.com.br/marcasemaquinas/2016/11/30/pulverizadores-empresas-investem-nos-equipamentos-automotrizes/>>. Acesso em: 12 jul. 2020.
- Cavalagli, N., Biscarini, C., Facci, A.L., Ubertini, F., Ubertini, S., 2017. “Experimental and numerical analysis of energy dissipation in a sloshing absorber”. *Journal of Fluids and Structures* 68, 466–481.
- Celis, M.A.C., Wanderley, J. B. V., Neves, M. A. S., 2017. “Numerical simulation of dam breaking and the influence of sloshing on the transfer of water between compartments”. *Ocean Engineering* 146, 125–139.
- El-Nahhal, Y., Hamdona, N., 2017. “Adsorption, leaching and phytotoxicity of some herbicides as single and mixtures to some crops”. *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences* 22, 17–25.
- Faltinsen, O.M., 1978. “A numerical nonlinear method of sloshing in tanks with two dimensional flow”, *J. Ship Res.* 22, 193–202.
- Faltinsen, O., Rognebakke, O., and Timokha, A., 2005. “Resonant three-dimensional nonlinear sloshing in a square-base basin. part 2. effect of higher modes”. *Journal of Fluid Mechanics* 523, 199–218.

- Fogal, M.L.F., Micheli, G.B., Padilha, A., Scalon, V.L., 2018. "Numerical and experimental analysis of radial fans applied in agricultural spreaders using cfd". Annals of ENCIT 2018, Águas de Lindóia, SP.
- Godderidge, B., 2006. "A phenomenological Rapid Sloshing Model for use as an operator guidance system on Liquefied Natural Gas carriers." University of Southampton, School of Engineering Sciences, PhD Thesis, 196p.
- Goudarzi, M.A., Sabbagh-Yazdi, S.R., 2012. "Investigation of nonlinear sloshing effects in seismically excited tanks". Soil Dynamics and Earthquake Engineering 43, 355–365.
- Gu, D., Cheng, C., Liu, Z., Wang, Y., 2019. "Numerical simulation of solid-liquid mixing characteristics in a stirred tank with fractal impellers". Advanced Powder Technology 30, 2126–2138.
- Guan, Y., Yang, C., Chen, P., Zhou, L., 2020. "Numerical investigation on the effect of baffles on liquid sloshing in 3D rectangular tanks based on nonlinear boundary element method". International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 12, 399–413.
- Hosain, M. L., Sand, U., Fdhila, R.B., 2018. "Numerical Investigation of Liquid Sloshing in Carrier Ship Fuel Tanks". IFAC-PapersOnLine 51, 583–588.
- Iranmanesh, A., Passandideh-Fard, M., 2017. "A 2D numerical study on suppressing liquid sloshing using a submerged cylinder". Ocean Engineering 138, 55–72.
- Ji, B., Luo, X., Peng, X., Wu, Y., Xu, H., 2012. "Numerical analysis of cavitation evolution and excited pressure fluctuation around a propeller in non-uniform wake". International Journal of multiphase flow 43, 13–21.
- Jiang, S.-C., Teng, B., Bai, W., Gou, Y., 2015. "Numerical simulation of coupling effect between ship motion and liquid sloshing under wave action". Ocean Engineering 108, 140–154.
- Joshi, A.Y., Bansal, A., Rakshit, D., 2017. "Effects of baffles on sloshing impact pressure of a chamfered tank". Procedia Engineering 173, 940–947.
- Jung J.H., Yoon H.S., Lee, C.Y., 2015. "Effect of natural frequency modes on sloshing phenomenon in a rectangular tank". International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 7 (3), 580–594.
- Kolaei, A., Rakheja, S., Richard, M.J., 2014. "Effects of tank cross-section on dynamic fluid slosh loads and roll stability of a partly-filled tank truck". Journal of Mechanics B/Fluids 46, 46-58.

- Kolaei, A., Rakheja, S., Richard, M.J., 2017. “Coupled multimodal fluid-vehicle model for analysis of anti-slosh effectiveness of longitudinal baffles in a partially-filled tank vehicle”. *Journal of Fluids and Structures* 70, 519-536.
- Liu, D., Tang, W., Wang, J., Xue, H., Wang, K., 2016. “Comparison of laminar model, RANS, LES and VLES for simulation of liquid sloshing”. *Applied Ocean Research* 59, 638–649.
- Liu, D., Tang, W., Wang, J., Xue, H., Wang, K., 2017. “Modelling of liquid sloshing using CLSVOF method and very large eddy simulation”. *Ocean Engineering*. 129, 160–176.
- Liu, Z., Feng, Y., Liu, Y., Lei, G., Li, Y., 2019. “Hydrodynamic performance on sloshing process in a liquid oxygen tank under intermittent excitation”. *Cryogenics* 98, 92–101.
- Liu, Z., Feng, Y., Liu, Y., Lei, G., Li, Y., 2020. “Fluid sloshing dynamic performance in a fuel storage tank under sinusoidal excitations”. *Applied Thermal Engineering* 168, 114814.
- Long, Y., Long, X., Ji, B., Huang, H., 2019. “Numerical simulations of cavitating turbulent flow around a marine propeller behind the hull with analyses of the vorticity distribution and particle tracks”. *Ocean Engineering*. 189, 106310.
- Lopez, A.A.O., 2020. “Contribuições à Metodologia de projeto de absorvedores líquidos sintonizados (ALS)”. Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental., 140 f.
- Lyu, W., el Moctar, O., Potthoff, R., Neugebauer, J., 2017. “Experimental and numerical investigation of sloshing using different free surface capturing methods”. *Applied Ocean Research* 68, 307–324.
- Micheli, G.B., 2014. “Avaliação da deposição e da agitação de calda em reservatórios de pulverizadores agrícolas utilizando uma análise numérica (CFD) e experimental”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – UNESP, Bauru, 57 f.
- Micheli, G.B., Padilha, A., Scalón, V.L., 2015. “Análise numérico-experimental da agitação de calda em reservatórios de pulverizadores agrícolas”. *Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering*, Vol. 35, n.6, pp. 1065–1078.
- Močilan, M., Žmindák, M., Pecháč, P., Weis, P., 2017. “CFD simulation of hydraulic tank”. *Procedia Engineering* 192, 609 – 614.

- Myrillas, K., Planquart, P., Simonini, A., Buchlin, J.-M., Schyns, M., 2017. “CFD and experimental investigation of sloshing parameters for the safety assessment of HLM reactors”. *Nuclear Engineering and Design* 312, 317–326.
- Nicolici, S., Bilegan, R. M., 2013. “Fluid structure interaction modeling of liquid sloshing phenomena in flexible tanks”. *Nuclear Engineering and Design* 258, 51–56.
- Nicolsen, B., Wang, L., Shabana, A., 2017. “Nonlinear finite element analysis of liquid sloshing in complex vehicle motion scenarios”. *Journal of Sound and Vibration* 405, 208-233.
- Park, W. M. et. al., 2019. “Simple analytical method for predicting the sloshing motion in a rectangular pool”. *Nuclear Engineering and Technology*, <https://doi.org/10.1016/j.net.2019.10.025>.
- Ponzini, R., Salvatore, F., Begovic E., Bertorello, C., 2020. “Automatic CFD analysis of planing hulls by means of a new web-based application: Usage, experimental data comparison and opportunities”. *Ocean Engineering* 210, 107387.
- Pukkella, A.K., Vysyaraju, R., Tammishetti, V., Rai, B., Subramanian, S., 2019. “Improved mixing of solid suspensions in stirred tanks with interface baffles: CFD simulation and experimental validation”. *Chemical Engineering Journal* 358, 621-633.
- Qin, H., Mu, L., Tang, W., Hu, Z., 2019. “Numerical study on structural response of anti-sloshing baffles of different configurations in a sloshing tank considering hydroelasticity”. *Ocean Engineering*. 188, 106290.
- Saghi, H., Lakzian, E., 2017. “Optimization of the rectangular storage tanks for the sloshing phenomena based on the entropy generation minimization”. *Energy* 128, 564–574.
- Shih, C.F., Chen, Y.W., Chang, J.R., Soon, S.P., 2021. “The Equal-Norm Multiple-Scale Trefftz Method for Solving the Nonlinear Sloshing Problem with Baffles”. *Computer Modeling in Engineering & Sciences* 127 (3), 993-1012.
- Silva, A.B., 2016. “Utilização de Fluidodinâmica Computacional (CFD) na Simulação de Vazamentos em Dutos”. *Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro*, 118 f.
- Sousa, J.B., Teixeira, M.B., Jakelaitis, A., Cunha, F.N., Silva, N.F., 2018. “Performance of Crops Grown in Succession to Soybeans Treated with Different Residual Herbicides”. *Planta Daninha*, 36, e018160229. Epub March 29, 2018. <https://doi.org/10.1590/s0100-83582018360100011>.

- Souza, J.F.A., Oliveira, R.L., Azevedo, J.L.L., Soares, I.D., Mata, M.M., 2011. “Uma revisão sobre a turbulência e sua modelagem”. *Rev. Bras. Geof.*, São Paulo , v. 29, n. 1, p. 21-41, URL <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2011000100002>.
- Sufyan, M., Ngo, L. C., Choi, H. G., 2017. “A dynamic adaptation method based on unstructured mesh for solving sloshing problems”. *Ocean Engineering*. 129, 203–216.
- Versteeg, Kaarle, H., Malalasekera, W., 2007. “An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method”. Pearson Education.
- Wang, W., Peng, Y., Zhang, Q., Ren L., Jiang, Y., 2017. “Sloshing of liquid in partially liquid filled toroidal tank with various baffles under lateral excitation”. *Ocean Engineering*. 146, 434–456.
- Wu, Q., Huang, B., Wang, G., Cao, S., Zhu, M., 2018. “Numerical modelling of unsteady cavitation and induced noise around a marine propeller”. *Ocean Engineering*. 160, 143–155.
- Xue, M.-A., Zheng, J., Lin, P., Yuan, X., 2017. “Experimental study on vertical baffles of different configurations in suppressing sloshing pressure”. *China Ocean Engineering* 136, 178–189.
- Zhang, C., Su, P., Ning, D., 2019. “Hydrodynamic study of an anti-sloshing technique using floating foams”. *Ocean Engineering*. 175, 62–70.