

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL

**DESENVOLVIMENTO DE MODELAGEM COMPUTACIONAL E AVALIAÇÃO
GEOMÉTRICA DE CHICANAS EM UM TANQUE MISTURADOR APLICANDO O
MÉTODO DESIGN CONSTRUTAL**

por

Laísa Luiz Soares

Tese para obtenção do Título de
Doutora em Modelagem Computacional

Rio Grande, dezembro 2021

Laísa Luiz Soares

“DESENVOLVIMENTO DE MODELAGEM COMPUTACIONAL E AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA DE ANTEPAROS EM UM TANQUE MISTURADOR APLICANDO O MÉTODO DESIGN CONSTRUTAL”

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, como requisito parcial para obtenção do Grau de Doutora. Área concentração: Modelagem Computacional.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA



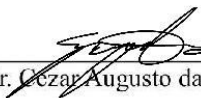
Prof. Dr. Marcelo Moraes Galarça (Orientador – IFRS)



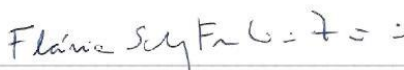
Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos (Coorientador – FURG)



Prof. Dr. Jerson Avila Souza (FURG)



Prof. Dr. Cezar Augusto da Rosa (FURG)



Profa. Dra. Flávia Schwarz Franceschini Zinani (Unisinos)

Rio Grande - RS
2021

Ficha Catalográfica

S676d Soares, Laísa Luiz.
 Desenvolvimento de modelagem computacional e avaliação
 geométrica de chicanas em um tanque misturador aplicando o método
 design construtal / Laísa Luiz Soares. – 2021.
 107 f.

 Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande –
 FURG, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional,
 Rio Grande/RS, 2021.
 Orientador: Dr. Marcelo Moraes Galarça
 Coorientador: Dr. Elizaldo Domingues dos Santos

 1. Modelagem e simulação de sistemas 2. Tanque misturador 3.
 Simulação numérica 4. Design construtal 5. Modelo de termo fonte I.
 Galarça, Marcelo Moraes II. Santos, Elizaldo Domingues dos III.
 Título.

CDU 004.414.23

Catálogo na Fonte: Bibliotecária Valéria Carlosso dos Santos Mazui CRB 7/6742

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi finalizado em tempos difíceis de pandemia, onde a resiliência precisou ser praticada todos os dias. Por isso, agradeço primeiramente à Deus, por me dar força e fé, mesmo nos dias mais duros e cansativos.

Agradeço ao meu orientador, prof. Marcelo Moraes Galarça, pela dedicação e empenho com esta pesquisa, que mesmo trabalhando à distância, sempre se fez presente e deu seu máximo para auxiliar na evolução deste trabalho. Obrigada também, pelos momentos de empatia, amizade e entendimento para comigo como pessoa.

Agradeço ao meu co-orientador prof. Elizaldo Domingues dos Santos, pela participação e empenho no desenvolvimento deste trabalho. Sem dúvidas, suas contribuições sempre foram de grande valia para aprimorar ainda mais a pesquisa.

Agradeço ao João Américo Aguirre Oliveira Júnior pela primordial ajuda com a programação do código numérico utilizado neste trabalho.

Agradeço à minha família, principalmente à minha mãe, Carmem Vânia, que sempre me ajudou e sempre entendeu meus momentos de ausência e minhas necessidades de privacidade para que eu pudesse estudar e me dedicar à vida acadêmica. Obrigada pelo apoio de sempre!

Agradeço aos meus amigos e colegas de laboratório, pela troca de conhecimentos, experiências, e acima de tudo pela amizade. Vou sentir falta dos momentos de “cafezinho”.

Gostaria de fazer um agradecimento especial à minha amiga e colega de Doutorado Glauciléia Magalhães, e também à amiga Sandra Regina Iribarrem, pela companhia e pela amizade durante todo esse tempo, vocês foram a minha família em Rio Grande. Obrigada por tudo!

Agradeço à todas as amigas que fiz em Rio Grande e que sem dúvidas fizeram a diferença na minha vida e estarão sempre no meu coração e nas minhas melhores lembranças.

Agradeço aos meus amigos de Bagé, por respeitarem a minha ausência em muitos momentos, e por entenderem que isso era necessário. Obrigada pelo apoio de sempre e pelo respeito comigo e com o meu trabalho.

Agradeço ao PPGMC e aos excelentes professores que tive o grande prazer em conhecer. Um agradecimento especial ao prof. Jeferson Avila Souza, que me acolheu desde o início, lá em 2015, quando entrei para o mestrado. O prof. Jeferson sempre foi um grande incentivador para mim e a quem eu tenho uma grande admiração.

Por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo apoio financeiro durante o Doutorado.

RESUMO

O presente trabalho apresenta um estudo da influência geométrica de chicanas sobre o escoamento em um tanque misturador. Para isso, um dos objetivos desta pesquisa é desenvolver um modelo computacional para simular a rotação do impelidor sem a necessidade de utilizar um modelo de malha móvel, o que causaria maior esforço e tempo computacional. Assim, foi implementado um código numérico que utiliza uma fonte de quantidade de movimento para simular a rotação do impelidor no interior do tanque, sem a necessidade de representação das fronteiras físicas do mesmo. O código é executado por meio de uma ferramenta existente no ANSYS/FLUENT® v.14.5, chamada UDF- *User Defined Function*. Este modelo foi comparado com o modelo de malha móvel, e ambos foram verificados e validados a partir de dados encontrados na literatura. O segundo objetivo do trabalho é o de avaliação geométrica das chicanas aplicando o método Design Construtal, baseado na lei Construtal. Com a aplicação deste método, espera-se melhorar o balanceamento de todas as resistências do escoamento no sistema, variando a quantidade e a dimensão das chicanas, a fim de encontrar configurações geométricas que indiquem uma maior eficiência da mistura. Os graus de liberdade do problema são as quantidades de chicanas (N_a) e a razão L/B (largura/comprimento das chicanas). Os indicadores de performance são considerados a partir da minimização do tempo de homogeneização e do desvio padrão da mistura. As equações de conservação de massa, quantidade de movimento e uma equação de transporte foram resolvidas através do método dos volumes finitos utilizando o software ANSYS/FLUENT® v.14.5, para modelar um escoamento tridimensional, turbulento e incompressível. Para a modelagem da turbulência foi utilizado $k - \varepsilon$. O modelo de termo fonte apresentou uma significativa redução do esforço computacional em relação ao modelo de malha móvel, o que permitiu realizar a avaliação geométrica das chicanas no interior do tanque. Os resultados demonstraram que, a aplicação do Design Construtal permitiu obter recomendações teóricas importantes sobre a influência das chicanas na distribuição da espécie transportada (representando a mistura) e no tempo necessário para homogeneizar a mistura no tanque. Os resultados indicam que, considerando os dois indicadores de performance (tempo de homogeneização e desvio padrão da mistura) o caso que apresentou a melhor eficiência foi o tanque com 4 chicanas e razão $L/B = 1$. Por outro lado, se o número de potência for considerado no problema, existem outras recomendações. Neste caso, o tanque que apresentou a melhor eficiência foi o tanque com 8 chicanas e razão $L/B = 0,25$, apresentando o menor desvio padrão e a menor potência simultaneamente.

Palavras-chaves: Tanque misturador. Simulação numérica. Design Construtal. Modelo de Termo Fonte.

ABSTRACT

Stirred tanks are key parts in mixing processes in various chemical industries. The performance in mixing homogenization is essential to obtain a good result in the final product. For this, some variables (physical and geometric) are considered of great importance and must be taken into consideration at the time of the process. One of the variables little investigated in the literature are the bulkheads installed on the tank walls. These aid in flow distribution, leading to better or worse mixing efficiencies. To study the influence of these baffles on the mixing tank, the present work has as its first objective to develop a computational model to simulate the impeller rotation without the need to use a sliding mesh model, which would cause greater effort and computational time. Thus, it was developed for this work, a source term model using UDF-User Defined Function, capable of reproducing the physics of the studied problem. This model was compared with the sliding mesh model, and both were verified and validated from data found in the literature. The second objective of the work is the geometric evaluation of the baffles applying the Construtal Design method, based on the Construtal law. By applying this method, it is expected to improve the balance of all flow resistances in the system by varying the amount and dimension of the baffles, in order to find geometric configurations that indicate a greater efficiency of the mixture. The degrees of freedom of the problem are the quantities of baffles (N_a) and the L/B ratio (width/length of the baffles). The performance indicators are considered from the minimization of the homogenization time and the standard deviation of the mixture. To evaluate the mixing and homogenization of the system, a tracer in the fluid volume was added, for this, a species transport model without chemical reaction was used. The equations of mass conservation, amount of motion and transport were solved by the finite volume method using ANSYS / FLUENT® v.14.5 software and considering a three-dimensional, turbulent and incompressible flow. For the modeling of turbulence, $k - \varepsilon$ was used. The results showed that the term source model, as well as the application of the Costructural Design method, allowed to obtain important theoretical recommendations on the influence of the baffles on the distribution of the transported species and on the time needed to homogenize the mixture in the tank. The results indicate that considering the two performance indicators (homogenization time and standard deviation of the mixture), the case with the best efficiency was the tank with 4 baffles and $L/B = 1$. On the other hand, if the power number is considered in the problem, there are other recommendations. In this case, the tank with the best efficiency was the tank with 8 baffles and $L/B = 0.25$, showing the smallest standard deviation and the smallest power simultaneously.

Key-words: Stirred tank. Numerical simulation. Constructal Design. Source Term Model.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. Justificativa.....	13
1.2. Hipótese científica.....	14
1.3. Objetivos	14
1.3.1. Objetivos Gerais:	14
1.3.2. Objetivos específicos:	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1. Agitação e mistura de fluidos	16
2.2. Chicanas	17
2.3. Tipos de impelidores	19
2.4. Tempo de mistura	20
2.5. Número de potência N_p	21
2.6. Lei Construtal.....	22
2.7. Método Design Construtal	23
3. ESTADO DA ARTE.....	26
4. MODELAGEM MATEMÁTICA E NUMÉRICA.....	31
4.1. Modelagem matemática	31
4.1.1. Equacionamento da UDF - <i>User Defined Function</i>	32
4.1.2. Método Design Construtal.....	33
4.1.3. Modelo de Transporte de Espécie.....	35
4.2. Modelagem Numérica	35
4.2.1. Modelo de malha móvel	36
4.2.2. Modelo de termo fonte.....	37
4.2.3. Modelo com transporte de espécie	39
4.3. Verificação e validação dos modelos computacionais desenvolvidos	40
4.4. Método GCI - <i>Grid Convergence Index</i>	41
5. RESULTADOS.....	44
5.1. Verificação e Validação do modelo numérico	44
5.2. Aplicação do Design Construtal ao Problema.....	54
5.3. Influência das diferentes configurações geométricas e quantidade das chicanas sobre o escoamento e o tempo da mistura	57
5.3.1. Tanque com 4 chicanas	59

5.3.2. Tanque com 6 chicanas	68
5.3.3. Tanque com 8 chicanas	76
5.3.4. Número de potência N_p	83
6. CONCLUSÕES.....	89
REFERÊNCIAS	91
APÊNDICE	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema representativo de um tanque misturador (Adaptado de: MCCABE et al., 1993).	17
Figura 2.2 – Comportamento do escoamento em um tanque sem chicanas (Adaptado de KOPELIOVICH, 2009).	18
Figura 2.3 – Comportamento do escoamento em um tanque com chicanas (Adaptado de KOPELIOVICH, 2009).	18
Figura 2.4 – Tipos de escoamento com relação ao impelidor. (a) escoamento axial. (b) escoamento radial (HARNBY <i>et al.</i> , 1997).	19
Figura 2.5 - Tipos de impelidores. (a) tipo hélice (b) tipo pá (c) turbina (DE MARTINI, 2010).	20
Figura 2.6 - Fenômenos animados e inanimados da manifestação da lei Construtal na natureza. (a) Brônquios dos pulmões. (b) Solo rachado. (c) Panela com arroz cozido. (d) Queda livre de um pedaço de papel higiênico (BEJAN e ZANE, 2012).	24
Figura 2.7 - Passos para a aplicação do método Design Construtal.	25
Figura 4.1 - Imagem esquemática da visão superior do tanque misturador.	34
Figura 4.2 - Esquema representativo das dimensões do tanque (Adaptado de: Javed et al. 2006). (a) Vista lateral. (b) Vista superior	36
Figura 4.3 - Esquema do domínio computacional para o modelo de malha móvel. (a) Visão geral do tanque. (b) Visão superior do tanque.	37
Figura 4.4 – Domínio computacional para o modelo de termo fonte. (a) visão frontal. (b) visão lateral.	38
Figura 4.5 - Região inicializada com fração de massa igual a 1.	39
Figura 5.1 - Malha independente escolhida a partir do método GCI. (a) visão lateral. (b) visão superior.	43
Figura 6.1 - Malha utilizada no modelo de malha móvel. (a) Visão lateral do tanque. (b) Visão superior do tanque. (c) Visão geral do impelidor. (d) Visão superior do impelidor.	45
Figura 6.2 - Campo vetorial. (a) Huang e Li (2013). (b) Modelo de malha móvel. (c) Modelo de termo fonte.	46
Figura 6.3 – Monitores. (a) Monitores em diferentes alturas. (b) Monitores em diferentes posições radiais.	47
Figura 6.4 - Comparação de resultados para a velocidade axial abaixo do impelidor.	48
Figura 6.5 - Comparação de resultados para a velocidade axial acima do impelidor.	49

Figura 6.6 - Comparação de resultados para a velocidade radial abaixo do impelidor.....	50
Figura 6.7 - Comparação de resultados para a velocidade radial acima do impelidor.....	51
Figura 6.8 - Comparação de resultados para a velocidade tangencial abaixo do impelidor. .	52
Figura 6.9 - Resultados da energia cinética da turbulência abaixo do impelidor.....	53
Figura 6.10 – Resultados da energia cinética da turbulência acima do impelidor.	54
Figura 6.11 - Árvore de simulações do método Design Construtal.	55
Figura 6.12 - Geometrias obtidas com a aplicação do Design Construtal para o caso com 4 chicanas.....	56
Figura 6.13 - Geometrias obtidas com a aplicação do Design Construtal para o caso com 6 chicanas.....	56
Figura 6.14 - Geometrias obtidas com a aplicação do Design Construtal para o caso com 8 chicanas.....	57
Figura 6.15 - Média temporal da energia cinética de turbulência para o tanque com 4 chicanas. (a) Sem chicanas. (b) $L/B = 1$. (c) $L/B = 0,29$. (d) $L/B = 0,14$. (e) $L/B = 0,08$. (f) $L/B = 0,05$. (g) $L/B = 0,03$. (h) $L/B = 0,02$	60
Figura 6.16 – Desvio padrão da fração de massa do traçador em função do tempo para os casos com 4 chicanas.....	61
Figura 6.17 – Comparação do campo vetorial da magnitude das velocidades em um plano vertical. (a) Tanque sem chicanas. (b) Tanque com 4 chicanas e $L/B=1$. (c) Tanque com 4 chicanas e $L/B=0,02$. (d) Tanque com 4 chicanas e $L/B=0,03$	64
Figura 6.18 - Distribuição do traçador no volume do tanque sem chicanas. Visão de um plano transversal.	65
Figura 6.19 - Distribuição do traçador no volume do tanque de 4 chicanas no tempo de 7 s. Visão de um plano transversal na região da chicana. (a) $L/B = 1$. (b) $L/B = 0,29$. (c) $L/B = 0,14$. (d) $L/B = 0,08$. (e) $L/B = 0,05$. (f) $L/B = 0,03$. (g) $L/B = 0,02$	66
Figura 6.20 - Evolução do traçador com o tempo em um tanque com 4 chicanas e $L/B = 1$. Visão de um plano de corte ao lado da chicana. (a) 1 s. (b) 2 s. (c) 3 s. (d) 4 s. (e) 5 s. (f) 6 s.	67
Figura 6.21 - Média temporal da energia cinética de turbulência para o tanque com 6 chicanas. (a) Sem chicanas. (b) $L/B = 1$. (c) $L/B = 0,375$. (d) $L/B = 0,145$. (e) $L/B = 0,075$. (f) $L/B = 0,045$. (g) $L/B = 0,035$. (h) $L/B = 0,015$	69
Figura 6.22 – Desvio padrão da fração de massa do traçador em função do tempo para os casos com 6 chicanas.	70
Figura 6.23 – Comparação do campo vetorial da magnitude das velocidades em um plano vertical.....	72

Figura 6.24 - Distribuição do traçador no volume do tanque de 6 chicanas no tempo de 7 s. Visão de um plano transversal na região da chicana. (a) $L/B = 1$. (b) $L/B = 0,375$. (c) $L/B = 0,145$. (d) $L/B = 0,075$. (e) $L/B = 0,045$. (f) $L/B = 0,035$. (g) $L/B = 0,015$	73
Figura 6.25 - Evolução do traçador com o tempo em um tanque com 6 chicanas e $L/B = 1$. Visão de um plano de corte ao lado da chicana. (a) 1 s. (b) 2 s. (c) 3 s. (d) 4 s. (e) 5 s.	75
Figura 6.26 - Média temporal da energia cinética de turbulência para o tanque com 8 chicanas. (a) Sem chicanas. (b) $L/B = 1$. (c) $L/B = 0,25$. (d) $L/B = 0,1$. (e) $L/B = 0,05$. (f) $L/B = 0,03$. (g) $L/B = 0,02$. (h) $L/B = 0,01$	77
Figura 6.27 – Desvio padrão da fração de massa do traçador em função do tempo para os casos com 8 chicanas.	78
Figura 6.28 – Comparação do campo vetorial da magnitude das velocidades em um plano vertical para um tanque sem chicanas e para um tanque com 8 chicanas. (a) Tanque sem chicanas. (b) Tanque com 8 chicanas e $L/B = 1$. (c) Tanque com 8 chicanas e $L/B = 0,01$ (d) Tanque com 8 chicanas e $L/B = 0,03$	80
Figura 6.29 - Distribuição do traçador no volume do tanque de 8 chicanas no tempo de 7 s. Visão de um plano transversal na região da chicana. (a) $L/B = 1$. (b) $L/B = 0,25$. (c) $L/B = 0,1$. (d) $L/B = 0,05$. (e) $L/B = 0,03$. (f) $L/B = 0,02$. (g) $L/B = 0,01$	81
Figura 6.30 - Evolução do traçador com o tempo em um tanque com 8 chicanas e $L/B = 1$. Visão de um plano de corte ao lado da chicana. (a) 1 s. (b) 2 s. (c) 3 s. (d) 4 s. (e) 5 s.	82
Figura 6.31 - Efeito de Na sobre o desvio padrão da fração de massa para a razão $L/B = 1$ no tempo de 7 s.	83
Figura 6.32 – Gráfico do número de potência versus razão L/B	85
Figura 6.33 – Efeito de Na sobre o Np mínimo e a correspondente geometria ótima para cada caso.	86
Figura 6.34 – Comparação entre desvio padrão da fração de massa e número de potência (Np). (a) Tanque com 4 chicanas. (b) Tanque com 6 chicanas. (c) Tanque com 8 chicanas.	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Dimensões (m) do tanque apresentado na Fig. 4.2 .	36
Tabela 5.1 - Aplicação do método GCI.	42
Tabela 6.1 - Média temporal da energia cinética de turbulência para diferentes razões L/B e diferentes quantidade de chicanas.	58
Tabela 6.2 - Valor máximo da variação da fração de massa do traçador em função do tempo no domínio do tanque para o caso com 4 chicanas.	61
Tabela 6.3 - Valores temporais médios das componentes de velocidade para o caso com 4 chicanas.	62
Tabela 6.4 - Valor máximo da variação da fração de massa do traçador em função do tempo no domínio do tanque para o caso com 6 chicanas.	68
Tabela 6.5 - Valores temporais médios das componentes de velocidade para o caso com 4 chicanas.	71
Tabela 6.6 - Valor máximo da variação fração de massa do traçador em função do tempo no domínio do tanque para o caso com 8 chicanas.	76
Tabela 6.7 - Valores temporais médios das componentes de velocidade para o caso com 8 chicanas.	79
Tabela 6.8 – Valor do Número de Potência: Comparação com a literatura.	84
Tabela 0.1 - Valores de N_p para cada razão L/B - tanque com 4 chicanas.	101
Tabela 0.2 - Valores de N_p para cada razão L/B - tanque com 6 chicanas.	101
Tabela 0.3 - Valores de N_p para cada razão L/B - tanque com 8 chicanas.	101

LISTA DE SÍMBOLOS

A_a	Área ocupada pelas chicanas [m ²]
A_F	Área do fluido [m ²]
A_I	Área ocupada pelo impelidor [m ²]
A_T	Área total do tanque [m ²]
B	Comprimento da chicana [m]
C	Distância entre o fundo do tanque e o impelidor [m]
C_f	Coefficiente de atrito
$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$	Constantes Ad hoc empregadas no modelo de turbulência
D	Diâmetro do impelidor [m]
dF	Força exercida pelo impelidor [N]
df	Força de arrasto [N]
$D_{i,m}$	Coefficiente de difusão para a espécie i na mistura [cm ² /s]
dS	Elemento de área na superfície da lâmina do impelidor [m ²]
F_s	Constante do método GCI
H	Altura do tanque [m]
H	Altura da lâmina do impelidor [m]
h_m	Tamanho da malha para o método GCI
$\vec{J}_i$	Fluxo de difusão da espécie i devido à gradientes de concentração [kg/m ² .s]
K	Energia cinética da turbulência [m ² /s ²]
L	Largura da chicana [m]
N_a	Número de chicanas
p	Pressão estática [N/m ²]
p_o	Ordem aparente do método GCI
R	Componente radial

Re_x	Número de Reynolds $Re_x = \frac{\rho v_r x}{\mu}$
r_f	Fator de refinamento da malha para o método GCI
Sc_T	Número de Schmidt turbulento
S_ε	Termo fonte empregado na equação da taxa de dissipação da turbulência
S_k	Termo fonte empregado na equação da energia cinética da turbulência
T	Diâmetro do tanque [m]
T	Tempo [s]
u	Velocidade linear [m/s]
$\vec{v}$	Vetor velocidade [m/s]
v_r	Velocidade radial [m/s]
v_θ	Velocidade tangencial [m/s]
W	Comprimento da lâmina do impelidor [m]
Y_i	Fração de massa local da espécie i
x	Distância entre o centro de uma célula computacional e o centro do eixo de rotação [m]
Z	Componente tangencial

Símbolos gregos

Δt	Passo de tempo [s]
ε	Taxa de dissipação da energia cinética de turbulência [m^2/s^3]
μ	Viscosidade dinâmica [$\text{N s}/\text{m}^2$]
μ_T	Viscosidade turbulenta [$\text{kg}/\text{m.s}$]
ρ	Massa específica [kg/m^3]
σ_ε	Número de Prandtl para ε
σ_k	Número de Prandtl para k
φ	Variável de estudo na aplicação do método GCI.
γ	Diferença entre as variáveis φ na aplicação do método
φ_{ext}	Valores extrapolados na aplicação do método GCI

Sub índices

A Chicana

F Fluido

F Fator

Grosseiro Malha grosseira

I Impelidor

i Espécie

m Malha

R Coordenada na direção radial

Refinado Malha refinada

θ Coordenada na direção azimutal

Z Coordenada na direção axial

LISTA DE ABREVIATURAS

CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
MVF	Método dos Volumes Finitos
UDF	<i>User Defined Function</i>
GCI	<i>Grid Convergence Index</i>
SIMPLE	<i>Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations</i>

1. INTRODUÇÃO

Tanques com agitação mecânica desempenham um papel importante e são bastante utilizados nas indústrias químicas, farmacêuticas, de alimentos, de produção de combustível, entre outras. A qualidade do produto final, depende fortemente da configuração e das condições de operação do tanque, ou seja, o desempenho do processo é de grande importância para alcançar a otimização da mistura. O aprimoramento do processo envolvendo estes tanques, requer uma cuidadosa compreensão das características do escoamento, bem como a necessidade de informações sobre a evolução da mistura (HARTMANN, 2016).

Os formatos dos tanques podem variar desde os cilíndricos até os poligonais, no entanto, o formato cilíndrico é o mais usual. Os impelidores podem ter diferentes formatos e quantidades, instalados em um eixo central ou não. As chicanas são distribuídas nas paredes do tanque para auxiliar no direcionamento do escoamento (FOUKRACH *et al.*, 2019; TILL *et al.*, 2018).

Em geral, o aprimoramento de tanques misturadores é basicamente voltado para a diminuição do tempo de mistura e do custo energético. No que tange o estudo numérico das características da mistura, é comum injetar um escalar passivo e monitorar o tempo necessário para sua homogeneização. Este escalar é transportado pelo escoamento, mas não reage, ou seja, não afeta o campo de escoamento em nenhum sentido dinâmico. Assim, a interação do transporte deste escalar com o campo de escoamento é dada pela velocidade instantânea que afeta a evolução escalar, enquanto que o escalar não influencia as características do escoamento. Desta forma, para estudar a eficiência da mistura utilizando um escalar passivo, um líquido secundário é introduzido no cálculo, e este funciona como um marcador inerte no líquido primário dentro do tanque. As distribuições temporais e espaciais da concentração do traçador são obtidas a partir da solução da equação de transporte de espécies para uma mistura não reagente. Deste modo, a evolução e o tempo de homogeneização do escalar ou do traçador no interior do tanque podem ser avaliados. No entanto, esta abordagem é mais adequada para prever o tempo de mistura de líquidos miscíveis, pois esses casos não envolvem uma interface de fase (BAŞBUĞ *et al.*, 2018b; JAVED *et al.*, 2006).

Na literatura são encontrados diversos estudos numéricos sobre o princípio de funcionamento de um tanque misturador, incluindo a análise das características do escoamento, tempo de mistura, gasto energético, entre outros (ALFARO-AYALA *et al.*, 2015; FOUKRACH *et al.*, 2019; ROY; ACHARYA, 2012; TILL *et al.*, 2018; YANG *et al.*, 2012). Estes estudos, geralmente variam o diâmetro do impelidor, a velocidade de rotação do impelidor, a quantidade de impelidores instalados em um mesmo eixo, a localização do eixo, e até mesmo o formato do tanque (cilíndrico ou poligonal).

No entanto, estudos que avaliem a influência das chicanas sobre o escoamento do sistema, ainda são bastantes prematuros na literatura.

Assim, o intuito é investigar a mistura no interior de um tanque com agitação mecânica e realizar uma avaliação geométrica da influência das chicanas na eficiência da mistura, utilizando para isso o método Design Construtal. Considerando como função objetivo a minimização do tempo de homogeneização, e a minimização do desvio padrão da mistura no interior do tanque (assumindo que quanto menor for o desvio padrão mais homogênea é a mistura), espera-se encontrar configurações geométricas e quantidade de chicanas que facilitem o escoamento de forma a melhorar a eficiência da mistura.

Neste sentido, a Mecânica dos Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics* - CFD) se destaca como uma poderosa ferramenta que pode auxiliar na avaliação da agitação e mistura de fluidos em tanques misturadores, podendo ter domínio sobre zonas de difícil visualização. A simulação numérica, permite prever, com relativa precisão, os campos de velocidade, turbulência, pressão, entre outros, empregando para isto, modelos matemáticos baseados nas leis de conservação de massa e quantidade de movimento, no domínio do espaço e do tempo. Assim, a CFD é uma boa alternativa para este estudo, pois possui baixo custo quando comparado ao experimental. Além disso, é capaz de resolver problemas complexos com condições de contorno gerais, e ainda apresenta resultados com relativa rapidez próximos do real. Desta maneira, a CFD pode servir de apoio para a tomada de decisão de novos projetos (MALISKA, 2004).

A partir destas considerações, este estudo visa contribuir com pesquisas e avanços científicos realizados neste mesmo contexto, já que, a aplicação do Design Construtal representa uma contribuição inédita para o estado da arte nesse tipo de problema.

1.1. Justificativa

Entende-se que a fluidodinâmica nos misturadores interfere diretamente na eficiência da mistura, desta forma, surge a necessidade do desenvolvimento de novos projetos, ou mesmo da otimização de tanques já existentes, a fim de alcançar melhores configurações para maximizar a mistura dos fluidos. Um ponto que tem sido pouco explorado na literatura, é com relação à influência das chicanas na eficiência da mistura. Desta forma, este trabalho visa contribuir com o melhoramento deste tipo de problema a partir de uma análise geométrica das chicanas, através da aplicação do método Design Construtal. Esta metodologia é bastante empregada e gera resultados relevantes em

diversas aplicações de engenharia com sistemas de escoamento de dimensões finitas. Além disso, a aplicabilidade deste método na análise geométrica de tanques misturadores ainda não foi investigada, o que faz com que esta proposta tenha uma contribuição científica relevante.

1.2. Hipótese científica

Acredita-se que a quantidade e a forma geométrica das chicanas possuam grande influência sobre a transferência de massa em tanques misturadores. Assim, pretende-se obter recomendações geométricas, aplicando o método Design Construtal, que conduzam aos melhores desempenhos da mistura, considerando como indicador de performance o menor tempo de homogeneização do sistema e o menor desvio padrão da fração de massa do traçador.

1.3. Objetivos

Nesta seção, são apresentados os objetivos gerais e específico para este trabalho.

1.3.1. Objetivos Gerais:

Desenvolver um modelo computacional para a abordagem da simulação numérica do escoamento no interior de um tanque misturador;

Obter recomendações teóricas com relação à eficiência da mistura no interior de um tanque com agitação mecânica, considerando a influência do formato e quantidade de chicanas instaladas nas paredes do tanque empregando o método Design Construtal.

1.3.2. Objetivos específicos:

- Desenvolver e validar o modelo de malha móvel e o modelo com termo fonte de quantidade de movimento;
- Verificar a capacidade de representação do problema físico para os dois modelos, e escolher qual será utilizado no andamento da pesquisa;

- Analisar numericamente o comportamento do escoamento, com e sem o uso de chicanas no tanque misturador;
- Analisar numericamente o comportamento da homogeneização da mistura;
- Avaliar o efeito da razão largura/comprimento (L/B) das chicanas sobre o desempenho da mistura (definido pelo desvio padrão da fração de massa) e tempo de homogeneização;
- Avaliar o efeito do número de chicanas sobre o desvio padrão da fração de massa e tempo de homogeneização uma vez minimizado e sobre as razões L/B uma vez otimizada, (L/B)o.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção são apresentados alguns conceitos importantes para melhorar o entendimento dos próximos capítulos deste trabalho, principalmente com relação à seção de metodologias e de resultados parciais.

2.1. Agitação e mistura de fluidos

A agitação de fluidos é um processo bastante antigo e comumente utilizado nas indústrias químicas. Ela pode ser utilizada em diversas aplicações, tais como: dispersão de um soluto num solvente, mistura de dois líquidos miscíveis, agitação de um líquido homogêneo para melhorar a transferência de calor para o líquido, entre outros. No entanto, apesar das diversas aplicações, para que se obtenha uma agitação eficiente, é necessário ajustar cuidadosamente os parâmetros da agitação ao resultado final desejado (FOUST *et al.*, 1982).

Com a agitação dos fluidos, a mistura ocorre por uma combinação de mecanismos: convecção causada por movimento em massa (agitação, por exemplo), difusão molecular e difusão turbulenta. A mistura é um processo físico onde ocorre a combinação de duas ou mais substâncias até que as fases se tornem indistinguíveis. Além disso, a mistura mecânica é o método mais utilizado para alcançar a homogeneização de fluidos (PAUL *et al.*, 2004).

Os tanques utilizados para a agitação de líquidos possuem, geralmente, formatos cilíndricos com eixos verticais, onde estão instalados os impelidores que, com uma determinada velocidade imposta por um motor, criará um padrão de escoamento ao sistema causando a circulação do líquido ao longo do tanque, e retornando, eventualmente, à região do impelidor. As dimensões do tanque variam de acordo com os objetivos do processamento, onde o topo poderá estar aberto ao ambiente ou fechado (MCCABE *et al.*, 1993). A Figura 2.1 apresenta uma ilustração de um tanque fechado para a agitação de líquidos.

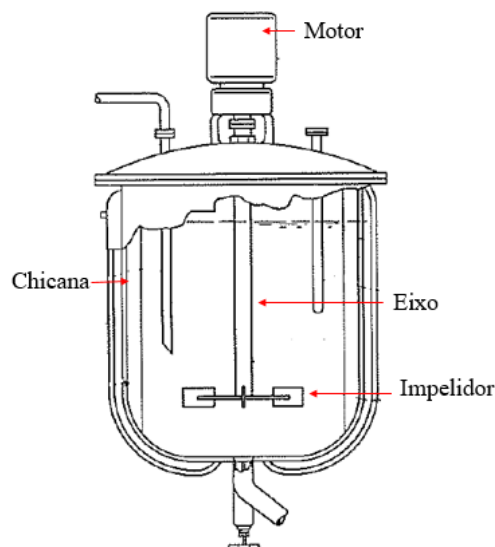


Figura 2.1 - Esquema representativo de um tanque misturador (Adaptado de: MCCABE et al., 1993).

Além disso, os tanques de agitação mecânica podem apresentar ou não a presença de chicanas, influenciando assim no tipo de escoamento.

2.2. Chicanas

Na mistura de líquidos com baixa viscosidade, é comum a formação de vórtices causados pela ação da força centrífuga que age no líquido em rotação devido à componente tangencial da velocidade do fluido, deixando a mistura mais pobre. Neste caso, a instalação de chicanas auxilia na prevenção desses vórtices, impedindo o escoamento rotacional sem interferir no fluxo radial ou axial, e maximizando assim a mistura. Geralmente, as chicanas são instaladas verticalmente (em formato retangular) perpendiculares ao topo e ao fundo do tanque. A quantidade de chicanas utilizadas varia de acordo com o tamanho do tanque, sendo geralmente até quatro chicanas. Ocasionalmente, uma pequena folga pode ser deixada entre a parede do tanque e as chicanas. Na Figura 2.1 podem ser observadas duas chicanas, no lado esquerdo e direito do tanque (HARNBY *et al.*, 1997; MCCABE *et al.*, 1993).

Existem também os tanques sem chicanas, porém, estes são uma configuração mais simples. Eles produzem um movimento giratório da mistura, formando um vórtice central, se parecendo com uma centrífuga. A eficácia do processo de mistura nesse tipo de tanque é relativamente

baixa (KOPELIOVICH, 2009). A Figura 2.2 mostra o comportamento do escoamento em tanques sem chicanas.

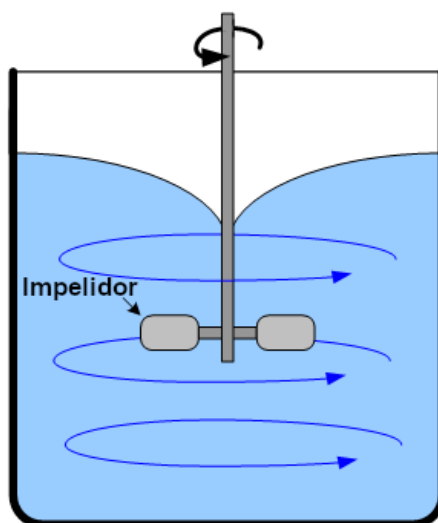


Figura 2.2 – Comportamento do escoamento em um tanque sem chicanas (Adaptado de KOPELIOVICH, 2009).

Por outro lado, a presença de chicanas impede esse comportamento, fornecendo um efeito de mistura mais eficaz. As chicanas auxiliam na diminuição da formação de vórtices na superfície central e geram escoamentos rotacionais complexos no interior do tanque (KOPELIOVICH, 2009). De maneira geral, a função das chicanas é transformar o escoamento tangencial em um escoamento tridimensional, com componentes nas direções axial, radial e tangencial (FOUKRACH *et al.*, 2020). A Figura 2.3 mostra a configuração do escoamento em tanques com chicanas.

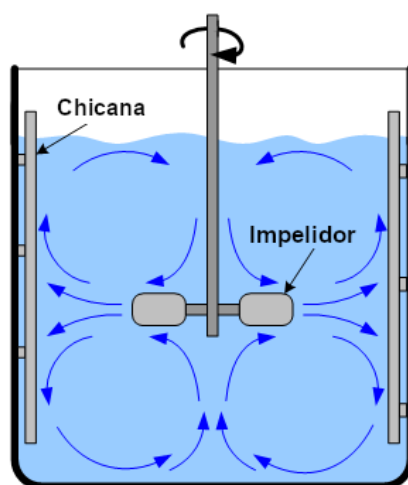


Figura 2.3 – Comportamento do escoamento em um tanque com chicanas (Adaptado de KOPELIOVICH, 2009).

Outro fator que tem grande influência na eficácia da mistura é o tipo de impelidor. Na próxima seção, são apresentados alguns tipos de impelidores mais utilizados em tanques misturadores.

2.3. Tipos de impelidores

Segundo McCabe *et al.* (1993) os impelidores são divididos em duas classes, os que geram correntes de escoamento paralelas ao eixo Fig. 2.4(a), também conhecidos como de corrente axial, e os que geram correntes de escoamento na direção radial e/ou tangencial, Fig. 2.4(b). Logo, o padrão de escoamento em um tanque misturador vai depender do tipo de impelidor utilizado, além das características do fluido (viscosidade, massa específica, miscibilidade), das dimensões do tanque e das chicanas. A velocidade do fluido em qualquer ponto no tanque, possui três componentes, radial (atua na direção perpendicular ao eixo), axial (atua na direção paralela ao eixo) e tangencial (atua na direção tangente, propiciando um movimento circular ao redor do impelidor).

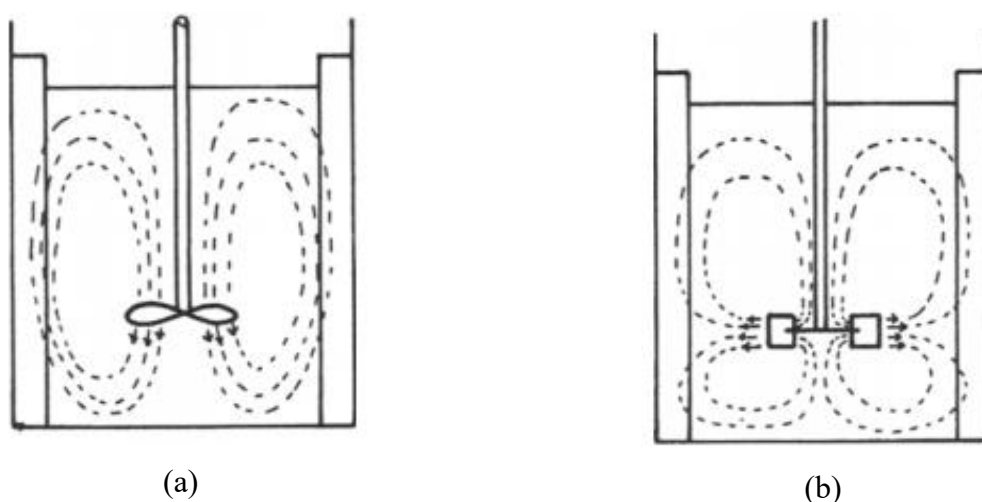


Figura 2.4 – Tipos de escoamento com relação ao impelidor. (a) escoamento axial. (b) escoamento radial (HARNBY *et al.*, 1997).

Os três principais tipos de impelidores são: os impelidores tipo hélice; os impelidores de pás; e as turbinas. Segundo McCabe *et al.* (1993) estes três principais tipos resolvem cerca de 95% de todos os problemas que envolvam agitação de líquidos em tanques.

- Impelidores tipo hélice, Fig. 2.5(a) – possuem escoamento axial e são utilizados para líquidos com baixa viscosidade. Geralmente, trabalham com velocidade entre 1150 e 1750 RPM, podendo ser instalados dois ou mais impelidores no mesmo eixo (MCCABE *et al.*, 1993).

- Impelidores de pás, Fig. 2.5(b) – possuem escoamento radial e são utilizados para problemas mais simples. Trabalham aproximadamente com uma velocidade entre 20 e 150 RPM. Estes impelidores também são encontrados com pás inclinadas, mas geralmente as pás são verticais. Mais de um impelidor de pás pode ser instalado em um mesmo eixo. Em baixas velocidades não se faz necessário o uso de chicanas, porém, para velocidades mais altas, as chicanas auxiliam na prevenção da formação de movimentos circulatorios, o que provocaria pouca mistura (*MCCABE et al.*, 1993).

- Turbinas, Fig. 2.5(c) – A turbina mostrada na Fig. 2.5(c) é uma turbina Rushton de seis lâminas planas, que gera escoamento nas direções radial e tangencial. Esta turbina possui uma ampla gama de aplicações, principalmente na indústria química. As componentes tangenciais produzem vórtices e turbilhões que interagem com as chicanas tornando a agitação eficaz. Na agitação de fluidos com baixa viscosidade, a turbina gera fortes correntes que persistem ao longo do tanque desfazendo zonas estagnadas (*HARNBY et al.*, 1997).

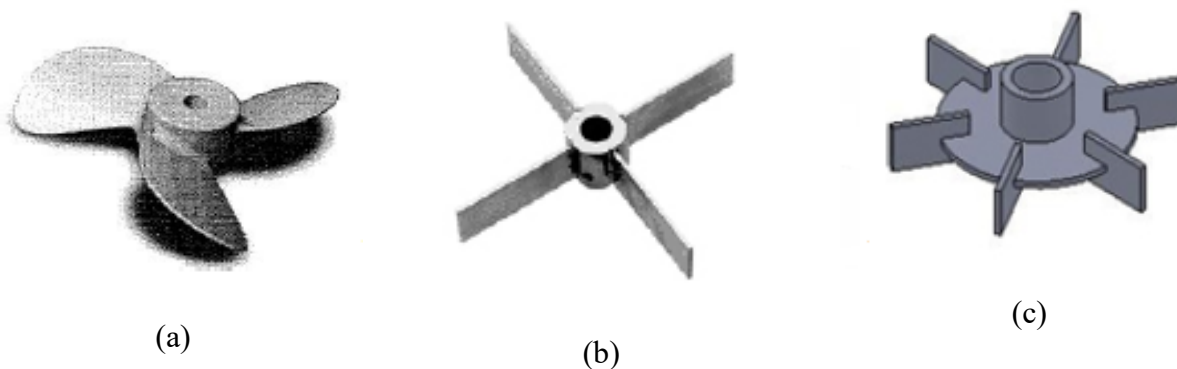


Figura 2.5 - Tipos de impelidores. (a) tipo hélice (b) tipo pá (c) turbina (DE MARTINI, 2010).

2.4. Tempo de mistura

Em sistemas com líquidos de baixa viscosidade, a mistura é basicamente influenciada pela intensidade da turbulência (que é mais intensa na região próxima ao impelidor e decai em regiões distantes do impelidor) e pela taxa de circulação do líquido. Assim, é desejável "circular" o líquido através das regiões de alta intensidade de turbulência tão frequentemente quanto possível (*HARNBY et al.*, 1997).

Considerando um escoamento monofásico em um tanque agitado, onde um determinado volume de material traçador (com a mesma viscosidade e massa específica do fluido principal) é adicionado, o "tempo de mistura" é o tempo medido a partir do instante de adição até que o conteúdo do tanque tenha atingido um grau específico de uniformidade quando o sistema é dito "misturado".

Uma forma de estimar a uniformidade na mistura no tanque é monitorando com o tempo a variância da concentração do traçador no interior do tanque (HARNBY *et al.*, 1997).

2.5. Número de potência N_p

O consumo de energia é um dos parâmetros mais importantes para avaliar o desempenho do tanque misturador, o que está diretamente relacionado com a eficiência do processo (LI; *et. al.*, 2020). No entanto, segundo Chapple *et al.* (2002), apesar de seu uso difundido, a dependência do consumo de energia na geometria do impelidor e do tanque é definida apenas em termos mais gerais. Isso se deve em parte à dificuldade de obter medições precisas de torque em pequena escala e, em parte, às limitações de previsão da teoria do arrasto, particularmente para escoamentos tridimensionais de recirculação.

De modo geral, o número de potência, segundo Nagata, (1956) é dado por

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D^5} \quad 2.1$$

onde P é a potência [W] requerida pelo impelidor, ρ é a massa específica [kg/m³] do fluido, N é a velocidade de rotação [rad/s] do impelidor e D é o diâmetro do impelidor [m].

A potência é usualmente calculada a partir da medição do torque e da velocidade do eixo

$$P = 2\pi N T_q \quad 2.2$$

onde T_q é o torque [N/m].

Combinando as equações 2.1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e 2.2, o número de potência, N_p , pode ser reescrito como:

$$N_p = \frac{2\pi N T_q}{\rho N^3 D^5} \quad 2.3$$

Outro método de calcular o N_p , é baseado no balanço de energia, no qual o número de potência do impelidor é calculado a partir da integração da taxa de dissipação de energia cinética da turbulência (ε) prevista a partir do modelo CFD. Segundo Huang e Li (2013), o N_p pode ser calculado como

$$N_p = \frac{\int_0^H \int_0^{2\pi} \int_0^{T/2} \frac{\rho \varepsilon r dr d\theta dz}{\rho N^3 D^5}}{\rho N^3 D^5} \quad 2.4$$

onde H é o diâmetro do tanque [m], T é a altura do tanque [m], ε é a taxa de dissipação da energia cinética de turbulência [m²/s³] e r é o raio do tanque [m].

Os estudos que avaliam o N_p em tanques misturadores utilizando turbina Rushton, encontraram valores próximos de 5 (CHAPPLE *et al.*, 2002; YAPICI *et al.*, 2008; HUANG; LI, 2013) e 6 (FOUKRACH *et al.*, 2020).

2.6. Lei Construtal

A lei Construtal, definida por Adrian Bejan, é considerada uma lei da física de design e evolução ao longo do tempo para sistemas de escoamento de dimensões finitas, que pode ser aplicada em toda a natureza, desde rios (inanimados) até projetos animados como tecidos vasculares, locomoção e organização social, Fig. 2.6. A lei Construtal, é considerada como sendo uma lei física, suficiente para predizer a evolução de sistemas de escoamento com dimensões finitas. Sendo assim, a aplicação dessa lei é capaz de predizer as melhores maneiras de projetar qualquer tipo de forma que envolva qualquer tipo de escoamento, por exemplo, sistemas de transporte, evolução da civilização e da ciência, fenômenos da engenharia, entre outros. De uma maneira geral, a lei Construtal afirma que: “Para que um sistema de escoamento de tamanho finito persista no tempo (para viver), sua configuração deve evoluir livremente de maneira a facilitar o acesso às correntes que fluem através dele” (BEJAN e ZANE, 2012). Neste sentido, considera-se que, todos os sistemas de escoamento evoluem sua forma e estrutura no tempo a fim de facilitar o movimento através do sistema termodinâmico sujeito as resistências internas. Sendo assim, as formas e estruturas vistas na natureza, não são o resultado do acaso. Elas se manifestam espontaneamente, porque facilitam o acesso ao escoamento no tempo.

Basicamente, os sistemas de escoamento possuem dois recursos básicos (propriedades): há a corrente que está fluindo (fluido, calor, massa, informação e etc), e o caminho pelo qual ela flui. Um raio, por exemplo, é um sistema de escoamento para descarregar eletricidade de uma nuvem. A estrutura de um raio, é visivelmente observada como sendo uma estrutura ramificada brilhante, pois essa é a maneira mais eficiente de mover uma corrente, neste caso a eletricidade, de um volume (a nuvem) para um ponto (a torre de uma igreja ou outra nuvem). Também encontramos uma estrutura semelhante a uma árvore nas passagens de ar em pulmões (um sistema de escoamento de oxigênio), no sistema sanguíneo do corpo humano (um sistema de escoamento de sangue) e nos dendritos de neurônios no cérebro (um sistema de fluxo de sinais elétricos). Este padrão semelhante a uma árvore surge em toda a natureza porque é uma forma eficaz para facilitar os escoamentos de um ponto à uma área ou de uma área a um ponto. No entanto, embora as estruturas de árvores sejam muito comumente

vistas na natureza, elas são apenas uma das manifestações da lei Construtal. Por exemplo, o desenho de animais que evoluíram para se mover melhor, isto é, para cobrir mais distância por unidade de energia útil, também é uma manifestação da lei Construtal. Isso inclui os tamanhos característicos dos órgãos, a forma dos ossos, o ritmo dos pulmões e do coração batendo, das caudas ondulantes, das pernas correndo e das asas pontudas. Todas essas formas surgiram, e trabalham juntas, para permitir que os animais se movam mais facilmente através de uma paisagem. Sendo assim, a lei Construtal determina que os sistemas de escoamento devem evoluir no tempo, adquirindo melhores configurações para fornecer mais acesso às correntes que fluem através delas. Contudo, não necessariamente a evolução da forma significa configurações mais complexas. A complexidade dos formatos está relacionada à magnitude do sistema de escoamento, e pode ser influenciada pela vizinhança do sistema analisado (BEJAN e ZANE, 2012).

2.7. Método Design Construtal

O método Design Construtal é fundamentado com base em um princípio de maximização do acesso do escoamento global em sistemas que estão livres para variar sujeitos a restrições. A geração da configuração do escoamento é vista como um fenômeno, e o princípio que explica sua ocorrência repetida na natureza, a lei Construtal, é determinístico. Assim, a configuração do escoamento (geometria, forma) pode ser fundamentada, ou seja, considerando que a lei Construtal busca configurações com acesso máximo e resistência mínima das correntes internas do sistema, o Design Construtal leva a configurações geométricas que minimizam estas resistências. No entanto, as resistências não podem ser eliminadas, mas elas podem ser distribuídas de forma que seu efeito global seja mínimo em todo o sistema. Logo, o sistema "se transforma" a caminho de sua configuração ideal, e, mesmo que no início a melhor configuração do sistema seja desconhecida, o método Design Construtal orienta os passos para a descoberta da mesma (BEJAN e LORENTE, 2008).

Assim, é importante destacar que, o Design Construtal não é uma metodologia de otimização, mas sim uma metodologia de definição do espaço de busca das configurações geométricas a serem investigadas. Para a otimização, é necessário associar um método de otimização como Busca Exaustiva ou o emprego de heurística como Algoritmos Genéticos, *Simulated Annealing*, *Differential Evolution* e outros (DOS SANTOS *et al.*, 2017). O Design Construtal é o método utilizado para aplicação da Lei Construtal em qualquer sistema de escoamento de dimensões finitas, baseado no princípio de restrições e objetivos (ROCHA *et. al.*, 2017). Para aplicar o Design Construtal, deve-se primeiramente entender o comportamento físico do problema a ser estudado para poder definir o(s)

indicador(es) de performance, restrições, bem como, os graus de liberdade que são variados dentro do espaço de busca.

Seguindo as recomendações apresentadas no trabalho de Dos Santos et al. (2017), a Fig. 2.7 mostra uma explicação mais detalhada e as principais etapas relacionadas à aplicação do método Design Constructal.

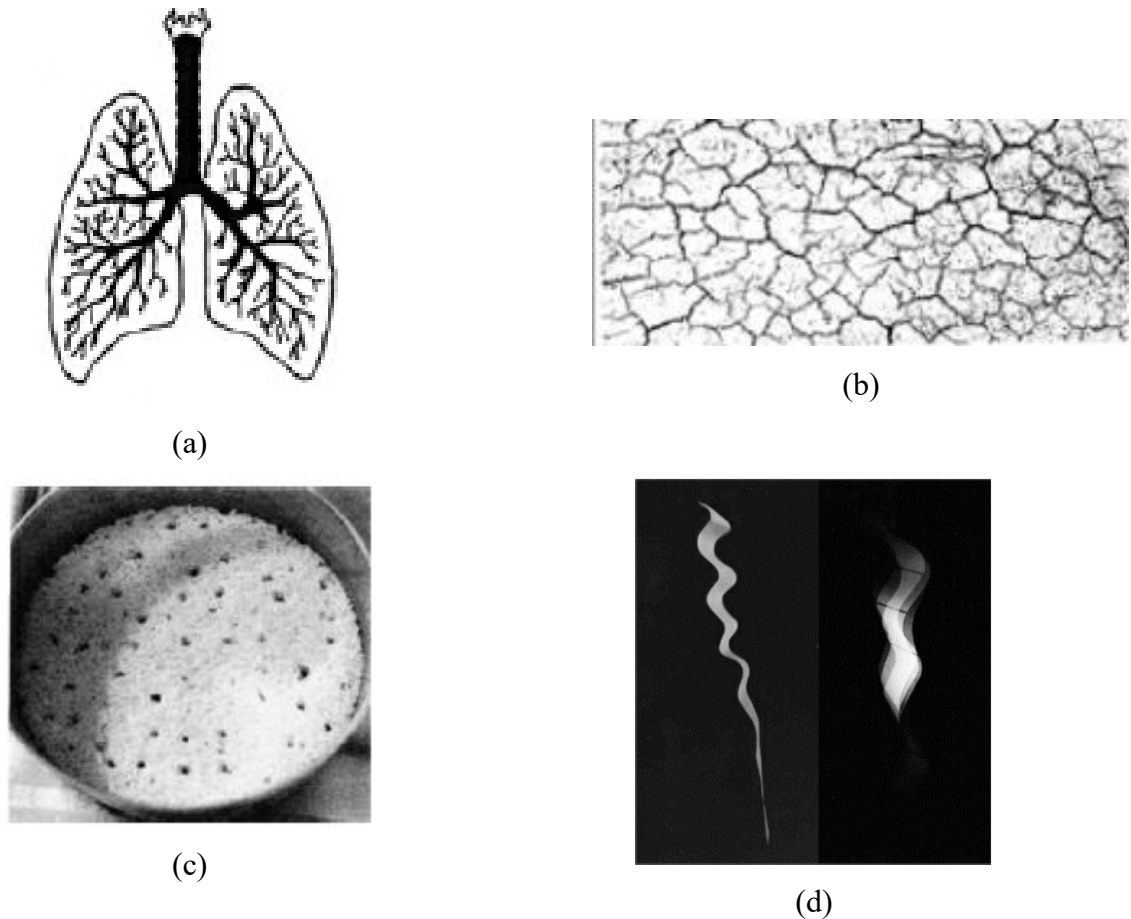


Figura 2.6 - Fenômenos animados e inanimados da manifestação da lei Construtal na natureza. (a) Brônquios dos pulmões. (b) Solo rachado. (c) Panela com arroz cozido. (d) Queda livre de um pedaço de papel higiênico (BEJAN e ZANE, 2012).

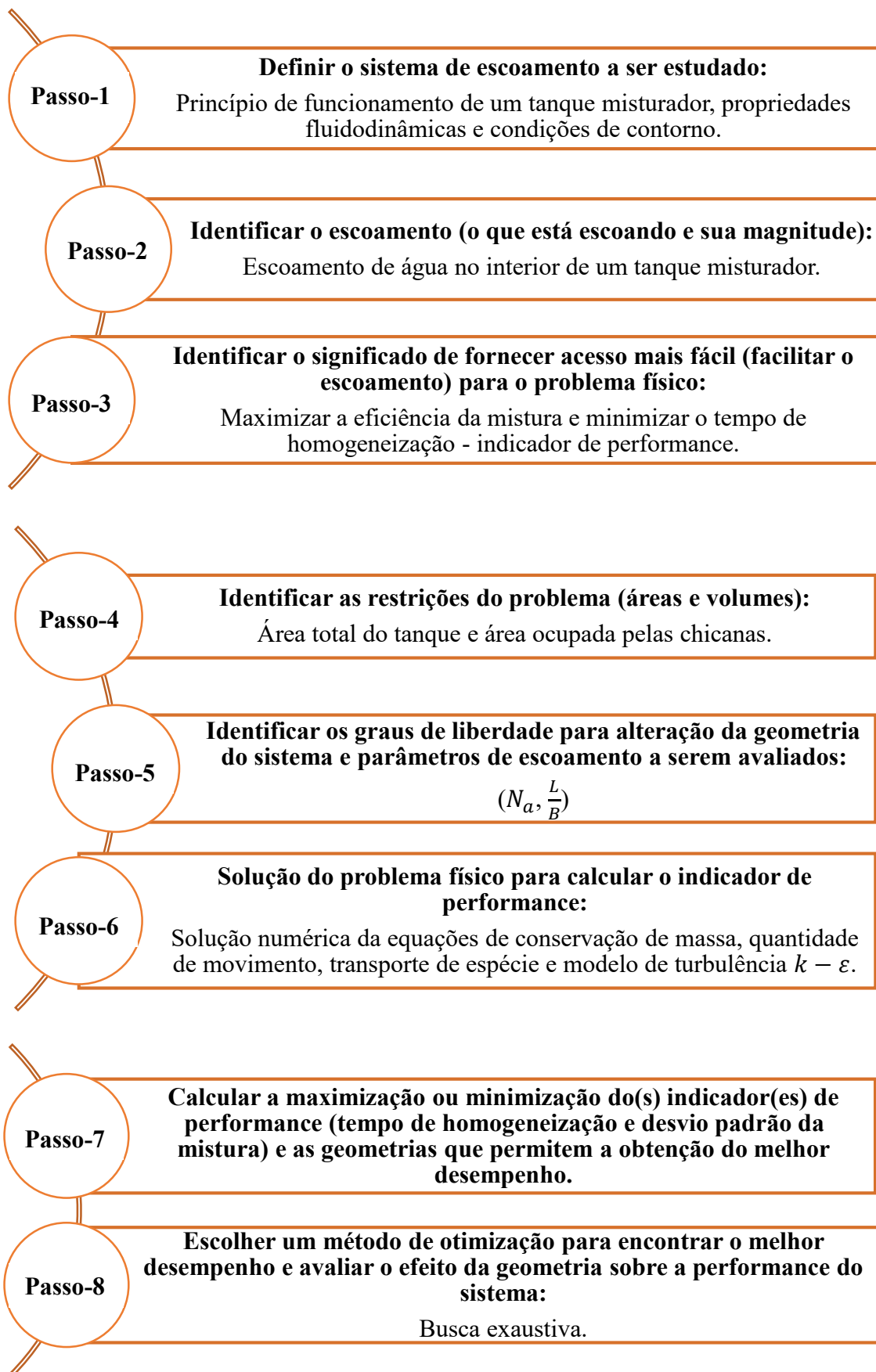


Figura 2.7 - Passos para a aplicação do método Design Construtal.

3. ESTADO DA ARTE

Um dos principais objetivos nas indústrias que utilizam tanques com agitação mecânica é diminuir o tempo de processo sem causar danos na eficiência da mistura, ou até mesmo maximizar a mistura em concomitância com a diminuição no tempo de agitação. Outra preocupação neste processo, é com relação ao consumo de energia que o tanque requer dependendo de suas configurações. O meio científico tem se mostrado bastante interessado em alcançar estes objetivos, e um olhar especial vem sendo dado através dos modelos a partir da CFD, que estão sendo amplamente utilizados neste tipo de problema. Existe uma vasta quantidade de estudos focados na melhoria do processo de agitação mecânica em tanques misturadores utilizando a simulação numérica, estudos estes, que têm mostrado um bom acordo e confiança no que diz respeito à comparação com resultados experimentais. As principais investigações numéricas com relação à eficiência da mistura nos tanques com agitação mecânica estão relacionadas ao tipo e tamanho do impelidor e sua localização, bem como, a presença ou não de chicanas, estando estes parâmetros intimamente ligados também, ao consumo de energia que o tanque requer para seu bom funcionamento.

Yeoh et al. (2005), utilizou o modelo de malha móvel e o modelo de turbulência LES para avaliar o tempo de mistura global, e as características de mistura localizadas em vários pontos ao longo de um tanque misturador. A análise transiente revelou que na região próxima do impelidor uma quantidade substancial do traçador ficou presa em entre duas chicanas verticais. A quantidade de movimento tangencial do fluido não foi suficientemente forte para transportar o escalar na direção circunferencial, fazendo com que a maior parte ficasse presa entre um par de chicanas. O histórico de tempo da concentração escalar revelou que a eficiência da mistura pode variar consideravelmente em diferentes zonas do tanque.

Hartmann et al. (2006), utilizaram o modelo de malha móvel e o modelo de turbulência LES para avaliar numericamente a influência do diâmetro de uma turbina Rushton sobre a mistura. Os resultados mostraram que o tempo de mistura é significativamente influenciado pelo tamanho do impelidor, isto é, o tempo de mistura diminui com o aumento diâmetro do impelidor.

Javed et al. (2006), utilizaram o modelo de malha móvel e o modelo $k - \varepsilon$ para avaliar a mistura no interior de um tanque através da distribuição de um escalar passivo. Os autores mostraram que o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ retorna previsões razoavelmente boas dos perfis de velocidades. No entanto, a energia cinética de turbulência é significativamente subestimada em todo o tanque. As distribuições temporais e espaciais previstas da concentração do traçador revelam uma correspondência direta com os níveis de turbulência no tanque. Com relação à homogeneização da

mistura, os resultados mostraram que, em geral, os perfis de concentração do traçador exibem flutuações iniciais, que decaem com o tempo e, eventualmente, atingem um valor de estado estacionário que representa a concentração do traçador totalmente misturado. No entanto, o tempo necessário para os perfis de concentração se aproximarem da condição totalmente misturada, irá depender das configurações geométricas do tanque.

Ochieng e Onyango (2008) utilizaram a CFD e técnicas experimentais para estudar o efeito da distância entre o fundo do tanque e o impelidor, nos campos fluidodinâmicos do escoamento, no tempo de mistura e no consumo de energia em um tanque misturador. Para estudar as características da mistura, os autores utilizaram um modelo de transporte de um escalar passivo. Para a modelagem da turbulência, foi utilizado o modelo $k - \varepsilon$. Os resultados mostraram uma redução no tempo de mistura e no consumo de energia quando a distância entre o fundo do tanque e o impelidor é menor.

Segundo Chtourou *et al.* (2011), o modelo $k - \varepsilon$ mostra boa concordância entre resultados numérico e experimentais, confirmando a validade da utilização deste modelo em estudos numéricos com tanques misturadores agitados por turbinas Rushton. Além deste, Joshi *et al.* (2011) também comprova a utilização do modelo $k - \varepsilon$ em simulações numéricas com tanques misturadores e turbinas Rushton.

Roy e Acharya (2012) utilizaram LES e uma combinação entre o modelo MRF e o modelo de malha móvel para simular o escoamento gerado por um impelidor com pás inclinadas no interior de um tanque misturador. Os autores avaliaram numericamente o comportamento da homogeneização de um escalar passivo variando as velocidades do impelidor. Observou-se que, durante o escoamento com velocidade fixa do impelidor, a mistura é prejudicada devido à formação dessas regiões segregadas não misturadas. A perturbação da velocidade do impelidor resulta em mudanças periódicas no perfil do jato do impelidor e aumento na energia cinética de turbulência. As regiões segregadas não misturadas quebram durante um ciclo de perturbação resultando em uma diminuição no tempo de mistura. Com isso, a variação na velocidade do impelidor pode ser uma estratégia de otimização de energia para uma mistura mais rápida.

Yang *et al.* (2012) analisaram numericamente o padrão e o tempo de mistura em um tanque com agitação mecânica sob condições de agitação concêntrica (o eixo do impelidor concêntrico com o eixo do tanque) e excêntrica (o impelidor foi posicionado em três localizações fora do eixo do tanque). As características da mistura foram estudadas utilizando um modelo de transporte de escalar passivo. Os resultados mostram que o tempo de mistura no tanque agitado excêntrico depende da posição do ponto de medição. Além disso, o tempo de mistura diminui com o aumento da excentricidade.

Alfaro-Ayala *et al.* (2015) utilizaram a CFD para encontrar a localização ótima para um e dois impelidores no eixo central de um tanque misturador. Os parâmetros estudados foram a distância entre o fundo do tanque e o impelidor, a distância entre os impelidores (para sistemas com dois impelidores) e o número de impelidores (um ou dois impelidores). Os autores estudaram diversas configurações, e encontraram um caso ótimo com relação à homogeneização e tempo de mistura para configurações de um e dois impelidores. Os autores utilizaram o modelo $k - \varepsilon$ para a modelagem da turbulência e um modelo de transporte de um escalar passivo para estudar as características da mistura.

Li e Xu (2017) utilizaram duas turbinas Rushton instaladas em um mesmo eixo para avaliar as características de mistura em um tanque com agitação mecânica. O tempo de mistura global e local foi determinado a partir da solução de uma equação de transporte escalar da concentração de um marcador. Foi avaliada também, a influência no processo de mistura dos pontos de inserção do marcador. Os resultados mostraram que, as posições de injeção do traçador têm grande influência na distribuição axial, no tempo de mistura local e no tempo de mistura global. Para o ponto de injeção entre os dois impelidores, a eficiência de mistura é a mais alta. Com o aumento da velocidade do impelidor, o tempo de mistura local e global diminui. Outro resultado importante, é que o padrão de escoamento tem influência significativa no processo de mistura e no tempo de mistura global. Ao alterar o espaçamento do impelidor e a folga do impelidor com o fundo do tanque, padrões de escoamento paralelo, convergente e divergente são formados.

Başbuğ *et al.* (2018a, 2018b) investigaram a influência sobre o consumo de energia de dois tipos de lâminas do impelidor, lâmina regular e irregular. Os autores concluíram que, por meio de modificações no formato da lâmina do impelidor é possível influenciar de forma crucial as estruturas dos vórtices, e consequentemente, o coeficiente de arrasto das pás, o torque do impelidor e as características de dissipação de energia. No caso do impelidor irregular, a redução do número de potência foi considerada promissora para uma maior eficiência do processo.

Till *et al.* (2018) investigaram a influência de um impelidor do tipo Rushton com diferentes quantidades de pás, e um segundo impelidor com quatro lâminas sobre a eficiência da mistura, considerando flutuações de velocidade para obter compreensão da homogeneidade do escoamento. Para analisar a mistura, os autores utilizaram um método baseado na distribuição média e desvio padrão da magnitude da velocidade. Foi considerado que, quanto maior for a flutuação média e quanto menor for o desvio padrão, maior será o nível de mistura. O modelo $k - \varepsilon$ foi utilizado para a modelagem da turbulência.

Foukrach *et al.* (2020) estudaram o efeito de quatro tipos de impelidores no escoamento em

tanques misturadores com e sem chicanas. Os autores analisaram o efeito dos tipos de impelidores na estrutura do escoamento hidrodinâmico, na redução do consumo de energia e no tamanho dos vórtices. Para a modelagem da turbulência foi utilizado o modelo $k - \varepsilon$. Os resultados mostraram que, a forma geométrica das chicanas e do impelidor é um fator que influencia muito no desempenho de um sistema agitado mecanicamente. Com relação à diminuição dos vórtices, o impelidor que apresentou o melhor resultado foi o DTBT (*diverging triangular blade turbine*). Já o agitador CTBT (*converging triangular blade turbine*) demonstrou uma economia importante no consumo de energia.

Outro tipo de investigação no campo de escoamento dos tanques misturadores, é com referência a ter ou não chicanas instaladas nas paredes do tanque, ou até mesmo o comprimento delas.

Mohiuddin et al. (2012) investigaram, de forma experimental e numérica, a influência no escoamento em um tanque misturador, da existência ou não de chicanas. Esta influência também foi estudada numericamente por Tamburini *et al.* (2018) em um tanque com e sem chicanas. De maneira geral, os autores identificaram que, para tanque com e sem chicanas, o número de potência é praticamente o mesmo para baixos números de Reynolds. Em tanques sem chicanas, o campo de escoamento é estável até $Re = 70$, mas, para Re superior, desenvolve uma instabilidade que resulta em um escoamento girando junto com o impelidor. Este comportamento não ocorre se o tanque possuir chicanas.

Recentemente, mais um estudo com relação ao formato e quantidade de chicanas em um tanque misturador, bem como com relação ao formato do tanque, foi apresentado por (FOUKRACH *et al.*, 2019). Os autores estudaram qual formato de tanque (cilíndrico ou poligonal) e de chicanas (retangulares verticais e circulares horizontais) auxiliam na diminuição do tamanho dos vórtices criados com a turbulência do escoamento, bem como na diminuição do consumo de energia. Os resultados mostraram que a forma poligonal apresenta resultados semelhantes aos do tanque cilíndrico. Já com relação às chicanas, foi concluído que, a chicana circular (com formato de anel ao redor de todo tanque) deve ser cortada em quatro lados com um determinado ângulo que auxilia na diminuição do consumo de energia e no tamanho do vórtice. Também foram estudadas quatro quantidade de chicanas ($NC = 1, 2, 3$ e 4). Observou-se uma diminuição no tamanho do vórtice e no consumo de energia para $NC = 1$ em comparação aos demais ($NC = 2, 3$ e 4).

Com estes últimos trabalhos citados, nota-se a escassez de pesquisas que considerem a influência da quantidade e das dimensões das chicanas sobre o escoamento e sobre a mistura.

Já no âmbito do método Design Construtal nota-se que, este método tem sido bastante aplicado como uma ferramenta poderosa para melhorar o formato de vários problemas de engenharia, como sistemas de refrigeração, trocadores de calor, fontes de energia renováveis, sistemas de transporte e

até mecânica dos sólidos.

Lorenzini *et al.* (2017) empregaram o Design Construtal para avaliar numericamente a configuração geométrica que facilita a transferência de calor através de uma via condutora em forma de T em um meio volumétrico gerador de calor com baixa condutividade térmica, com o objetivo de minimizar o máximo excesso de temperatura sobre todo o sistema.

Martins *et al.*, (2018) estudaram, a partir deste método, a geometria em escala real, de um conversor de energia das ondas do tipo galgamento, a fim de maximizar sua potência.

Fagundes *et al.* (2019) utilizam o Design Construtal para realizar a otimização geométrica de um caminho tri-bifurcado assimétrico de materiais altamente condutores (inserções) que removem um fluxo de calor constante de um corpo e o entregam a três dissipadores de calor isotérmicos.

Birinci *et al.* (2020) determinaram a relação ótima de geração de calor entre fontes discretas de calor gerando diferentes quantidades de calor, a fim de amenizar os pontos mais quentes. Seis diferentes taxas de geração de calor foram consideradas seguindo o método Design Construtal.

Gonzales *et al.* (2021) utilizaram o Design Construtal para obter a otimização geométrica de cavidades inseridas em uma parede sólida com geração interna de calor minimizando o máximo excesso de temperatura no domínio sólido. Para esse estudo, foram analisados 7 graus de liberdade aplicando o método Simulated Annealing para a otimização geométrica.

Outra aplicação do método é encontrada na área estrutural, conforme apresentado por Da Silveira *et al.* (2021). Os autores mostraram que o Design Construtal também pode ser utilizado em problemas de engenharia civil como um método eficaz de avaliação geométrica, e comprovaram a aplicabilidade do método na mecânica dos materiais. Neste trabalho, foi analisado o formato de enrijecedores sobre a distribuição de tensões em placas submetidas a solicitações mecânicas. As melhores configurações obtidas foram as que distribuíram mais homogeneamente as tensões mecânicas, o que está de acordo com o princípio Construtal da “ótima distribuição das imperfeições”.

Atualmente, o Design Construtal também vem ganhando popularidade em problemas aplicados à medicina. Dutra *et al.*, (2020), (2021) e Impiombato *et al.*, (2021), aplicaram o Design Construtal em problemas de hemodinâmica, como uma ferramenta para descrever o sistema biológico na busca por melhor desempenho do fluxo sanguíneo.

Com os trabalhos apresentados nesta seção, nota-se a ampla aplicabilidade do método Design Construtal. Por outro lado, até o atual momento, este método ainda não foi aplicado no estudo de tanques misturadores, sendo esta a principal novidade deste trabalho.

4. MODELAGEM MATEMÁTICA E NUMÉRICA

Neste capítulo são apresentadas as equações que governam o fenômeno físico do problema, bem como, os modelos numéricos utilizados para calcular a solução deste através de simulação numérica.

4.1. Modelagem matemática

As equações que governam o fenômeno físico do problema, e que são resolvidas numericamente neste trabalho, são as equações da continuidade (conservação de massa) e as equações de Navier-Stokes (quantidade de movimento). A modelagem da turbulência é realizada utilizando o modelo $k - \varepsilon$ que resolve as equações da energia cinética turbulenta e da sua taxa de dissipação. Este modelo é normalmente utilizado na literatura para simular numericamente escoamentos no interior de tanques misturadores, como é apresentado nos trabalhos de Foukrach *et al.* (2019); Huang e Li (2013); Javed *et al.* (2006).

A equação da continuidade para um escoamento turbulento, incompressível e transiente, é dada por Schlichting e Gersten, (2003),

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (4.1)$$

onde, $\bar{u}$, $\bar{v}$ e $\bar{w}$ representam médias temporais das componentes de velocidade [m/s].

As equações de Navier-Stokes para um escoamento turbulento, incompressível e com viscosidade constante são dadas por Schlichting e Gersten, (2003),

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) \quad (4.2)$$

$$= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + (\mu + \mu_T) \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right) + \rho g_x + F_x$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) \quad (4.3)$$

$$= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + (\mu + \mu_T) \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} \right) + \rho g_y + F_y$$

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) \\ &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + (\mu + \mu_T) \left(\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2} \right) + \rho g_z + F_z \end{aligned} \quad (4.4)$$

onde, ρ é massa específica do fluido [kg/m^3], $\bar{p}$ representam a média temporal da pressão [N/m^2], μ é a viscosidade dinâmica [N s/m^2] e μ_T é a viscosidade turbulenta dada por,

$$\mu_T = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.5)$$

As equações de transporte para a energia cinética da turbulência e sua taxa de dissipação no modelo $k - \varepsilon$, são dadas, respectivamente, por Jones; Launder, (1972):

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_T \partial k}{\sigma_k \partial y} \right) + \mu_T \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 - \rho \varepsilon \quad (4.6)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_T \partial \varepsilon}{\sigma_\varepsilon \partial y} \right) + c_1 \frac{\varepsilon}{k} \mu_T \left(\frac{\partial \mu}{\partial y} \right)^2 - c_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \quad (4.7)$$

c_1 , c_2 , e c_μ são constantes do modelo, onde $c_1 = 1,44$, $c_2 = 1,92$ e $c_\mu = 0,09$. σ_k e σ_ε são os números de Prandtl para k e ε , respectivamente.

4.1.1. Equacionamento da UDF - *User Defined Function*

Para o modelo utilizando a fonte de quantidade de movimento, um equacionamento para a UDF foi desenvolvido seguindo as recomendações de Huang e Li (2013).

A UDF é uma função definida pelo usuário, onde sua subrotina é basicamente escrita em linguagem de programação C, que pode ser carregada dinamicamente com o solucionador com o objetivo de aprimorar os recursos padrões do software (FLUENT, 2009). Desta forma, é possível definir um termo fonte que descreve a rotação do impelidor no interior do tanque sem a necessidade de utilizar uma malha móvel. O equacionamento utilizado para a UDF é apresentado a seguir, e o código contendo este equacionamento pode ser visto no Apêndice-1.

Segundo Huang e Li (2013) a força exercida pelo impelidor é dada por,

$$dF = \rho \cdot dS \cdot u(u - v_\theta) \quad (4.8)$$

onde dS é a área da seção transversal da interface entre o fluido e a lâmina do impelidor, u é a velocidade linear do elemento de área na superfície da lâmina dS e v_θ é a velocidade tangencial do fluido girando com o impelidor antes do fluido ser impulsionado pelo mesmo. Para considerar o efeito do arrasto no movimento do fluido, uma equação de resistência é introduzida para calcular a força de arrasto df dada como,

$$df = \frac{1}{2} \rho \cdot v_r^2 C_f \cdot dS \quad (4.9)$$

onde f é a força de arrasto na célula computacional, v_r é a velocidade radial do fluido e C_f é o coeficiente de atrito local em função de Reynolds, que é calculado como,

$$\begin{aligned} C_f &= 0,664 \cdot Re_x^{-0,5} \\ Re_x &\leq 5 \times 10^5 \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} C_f &= 0,0557 \cdot Re_x^{-0,2} \\ 5 \times 10^{-5} &< Re_x < 1 \times 10^7 \end{aligned} \quad (4.11)$$

onde Re_x é dado por,

$$Re_x = \frac{\rho v_r x}{\mu} \quad (4.12)$$

e x é a distância entre o centro da célula computacional e o centro do eixo de rotação e μ é a viscosidade dinâmica.

4.1.2. Método Design Construtal

Com o sistema de escoamento definido, para realizar o equacionamento do método Design Construtal, considera-se os objetivos a serem alcançados com a aplicação do referido método. Neste caso, minimizar o tempo de mistura e maximizar a homogeneização da mistura. Após, são definidas as restrições do problema, isto é, de que modo a geometria pode variar obedecendo limites de área e/ou volume do domínio. Assim, o problema em questão, está submetido à duas restrições, a área total do tanque A_T e a área ocupada pelas chicanas A_d . Desta maneira, a evolução da geometria do sistema deve acontecer obedecendo estas restrições. Logo, observando a Fig. 4.1, o equacionamento para a aplicação do método Design Construtal é dado por,

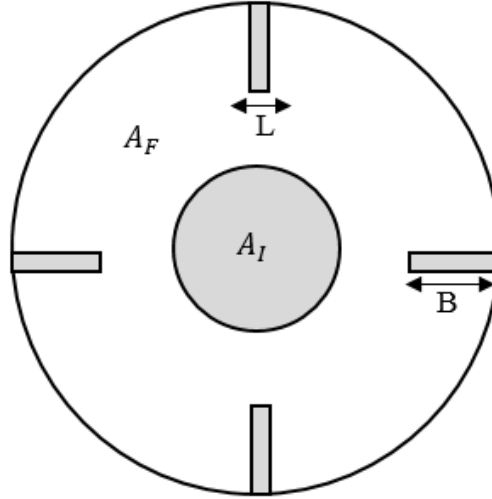


Figura 4.1 - Imagem esquemática da visão superior do tanque misturador.

$$A_T = A_F - A_I \quad (4.13)$$

onde, A_T é a área total do tanque, A_F é a área do fluido e A_I é a área ocupada pelo impelidor.

$$A_a = N_a \cdot L \cdot B \quad (4.14)$$

onde A_a é a área ocupada pelas chicanas, N_a é o número de chicanas, B é o comprimento da chicana e L é a largura da chicana.

A quantidade de chicanas N_a e as dimensões L e B são definidas considerando a restrição de área das chicanas. A altura das chicanas são mantidas fixas (igual a altura do tanque). Assim, tem-se uma equação e três variáveis, sendo necessário definir dois graus de liberdade para a solução deste problema, que são: N_a e $\frac{L}{B}$. Sendo estas variáveis definidas pelas seguintes equações:

$$B = \left(\frac{\phi}{N_a \left(\frac{L}{B} \right)} \right)^{1/2} \quad (4.15)$$

$$L = \left(\frac{L}{B} \right) \cdot B \quad (4.16)$$

onde ϕ é a razão entre a restrição da área ocupada pelas chicanas e a restrição da área do tanque, dado por:

$$\frac{A_a}{A_T} = \phi \quad (4.17)$$

Além disso, as dimensões L e B possuem um limite para variar, isto é, B pode variar de maneira que seu comprimento máximo não ultrapasse a área ocupada pelo impelidor. Já o limite de L é a largura máxima que ele pode ocupar dentro do tanque.

Com os graus de liberdade definidos, a avaliação geométrica se dá a partir da variação de um grau de liberdade mantendo o outro fixo, juntamente com as restrições. Desta forma, é possível observar como os graus de liberdade afetam os indicadores de performance (tempo de homogeneização da mistura e desvio padrão da mistura no interior do tanque).

4.1.3. Modelo de Transporte de Espécie

Com relação à análise numérica da homogeneização do escoamento, utilizou-se o modelo de transporte de espécie (sem reações químicas) presente no software FLUENT®. Neste modelo, é possível prever a fração de massa local da espécie que está sendo transportada através da solução de uma equação de convecção-difusão dada por, (FLUENT, 2009),

$$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + (\nabla \rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i \quad (4.18)$$

onde Y_i é a fração de massa local da espécie i e $\vec{J}_i$ é o fluxo de difusão da espécie i que surge devido à gradientes de concentração. Para escoamentos turbulentos, $\vec{J}_i$ é dado por,

$$\vec{J}_i = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_T}{Sc_T}\right) \nabla Y_i \quad (4.19)$$

onde, Sc_T é o número de Schmidt turbulento e $D_{i,m}$ é o coeficiente de difusão para a espécie i na mistura. Por padrão, o FLUENT® utiliza o número de Schmidt igual a 0,7.

4.2. Modelagem Numérica

Para simular o movimento de rotação do impelidor de maneira a reproduzir o princípio de funcionamento de um tanque misturador, foram desenvolvidos dois modelos numéricos: (1) o que se utiliza de malha móvel; e (2) o que faz uso de termo fonte para a quantidade de movimento. As seguintes dimensões do tanque, Fig. 4.2 e Tab. 4.1, foram consideradas.

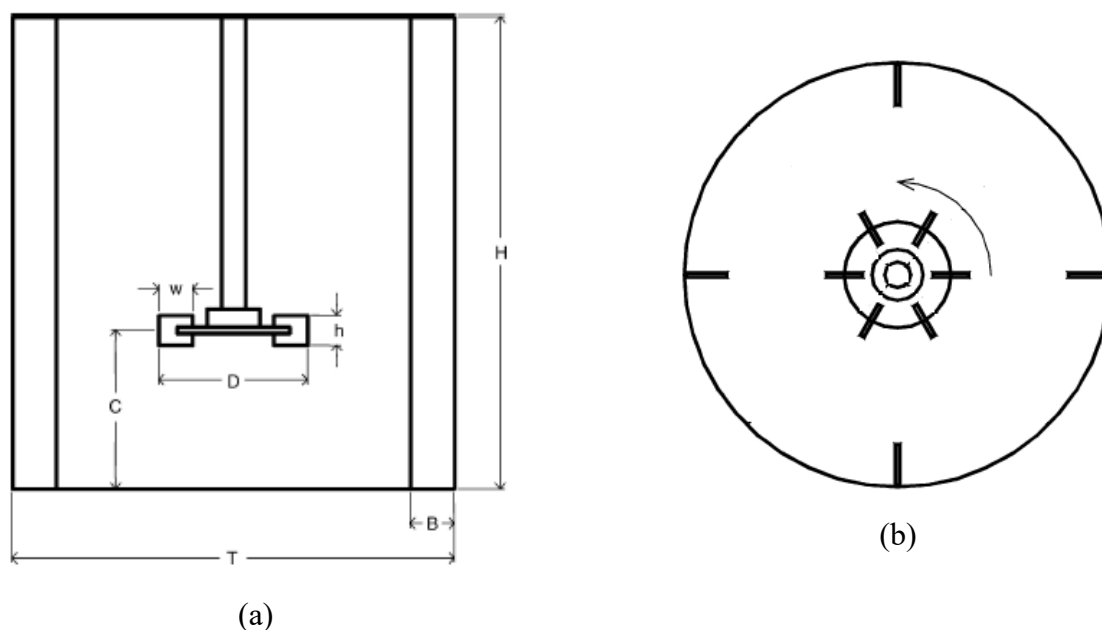


Figura 4.2 - Esquema representativo das dimensões do tanque (Adaptado de: Javed et al. 2006). (a) Vista lateral. (b) Vista superior

Tabela 4.1 - Dimensões (m) do tanque apresentado na Fig. 4.2 .

T	H	D	W	H	B	C
0,296	0,296	T/3	D/4	D/5	T/10	T/3

4.2.1. Modelo de malha móvel

No modelo de malha móvel, o tanque é dividido em duas regiões que são tratadas separadamente, a região do impelidor e a região do tanque (que inclui o fluido, as paredes laterais do tanque, o fundo, o topo e as chicanas). Um esquema representativo do domínio computacional para o modelo de malha móvel pode ser observado na Fig. 4.3. A malha presente na região cilíndrica, contendo o impelidor, rotaciona com uma determinada velocidade angular, enquanto a região do tanque permanece estacionária, desta forma, as malhas deslizam através desta interface cilíndrica. Assim, o impelidor presente no interior do volume cilíndrico rotaciona de acordo com o movimento deste volume. Este método é capaz de prever a evolução do escoamento no tempo, mas também apresenta um elevado custo computacional.

As condições de contorno para este modelo são: condição de malha deslizante para a região cilíndrica; para o eixo do impelidor é dada uma condição de parede móvel, com uma velocidade

angular igual à do impelidor; o topo do tanque é tratado como uma tampa plana e rígida, com uma condição de parede deslizante (cisalhamento nulo); o restante do tanque é fixo, e tratado como parede.

As dimensões da geometria apresentada na Fig. 4.3 seguem as mesmas dimensões do trabalho de Javed et al. (2006) e podem ser lidas na Tab. 4.1.

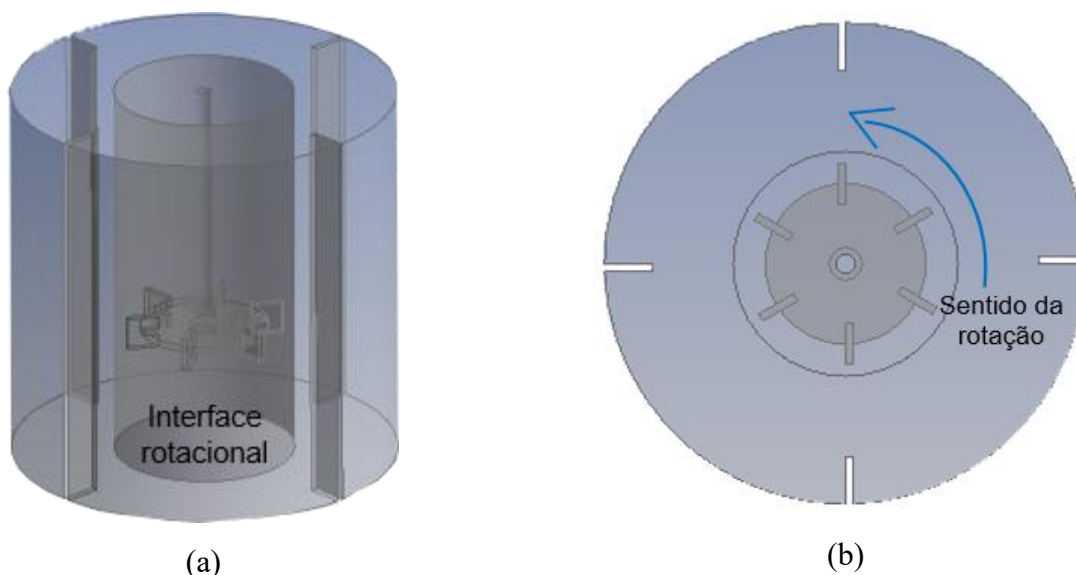


Figura 4.3 - Esquema do domínio computacional para o modelo de malha móvel. (a) Visão geral do tanque. (b) Visão superior do tanque.

4.2.2. Modelo de termo fonte

No modelo de termo fonte, o impelidor é substituído por uma geometria derivada da revolução de uma das lâminas, onde o formato se aproxima de um toróide cujo raio maior é o mesmo raio máximo do impelidor caso houvesse este. Assim, o movimento do impelidor é descrito a partir de uma fonte de quantidade de movimento rotacional, adicionada na equação de conservação da quantidade de movimento, através de uma UDF (*User Defined Function*) apresentada no Apêndice-1. A malha para este modelo é totalmente fixa, o que auxilia na redução do esforço e do tempo computacional. Outro aspecto importante é que, neste caso, é possível representar apenas parte do domínio computacional, (considerando o comportamento simétrico do problema), o que também reduz significativamente o esforço e o tempo computacional. Um esquema de $\frac{1}{4}$ do domínio computacional utilizado para este modelo numérico é apresentado na Fig. 4.4. O volume do disco atuador apresentado nas Figs. 4.4(a)-(b) é, na verdade, o impelidor, que neste caso é substituído por um disco atuador. Já a superfície presente no interior deste volume, é uma superfície com uma

velocidade de rotação imposta. O disco atuador, corresponde à geometria que substitui o impelidor, e é nele que a condição de termo fonte é adicionada. As duas paredes laterais (criadas a partir do corte do domínio para gerar uma geometria de $\frac{1}{4}$), incluindo o corte no disco atuador, são tratadas como periódicas. A condição de periodicidade é normalmente utilizada quando a geometria física de interesse e o padrão esperado do escoamento têm uma natureza de repetição periódica. Assim, é possível simular apenas parte do domínio e replicar os resultados, para o restante do domínio, no final da simulação.

O topo do tanque é tratado como uma tampa plana e rígida, com condição de parede deslizante. O restante do tanque recebe o tratamento de parede.

As dimensões da geometria apresentada na Fig. 4.4 também seguem as mesmas dimensões do trabalho de Javed *et al.* (2006), apresentadas na Tab. 4.1.

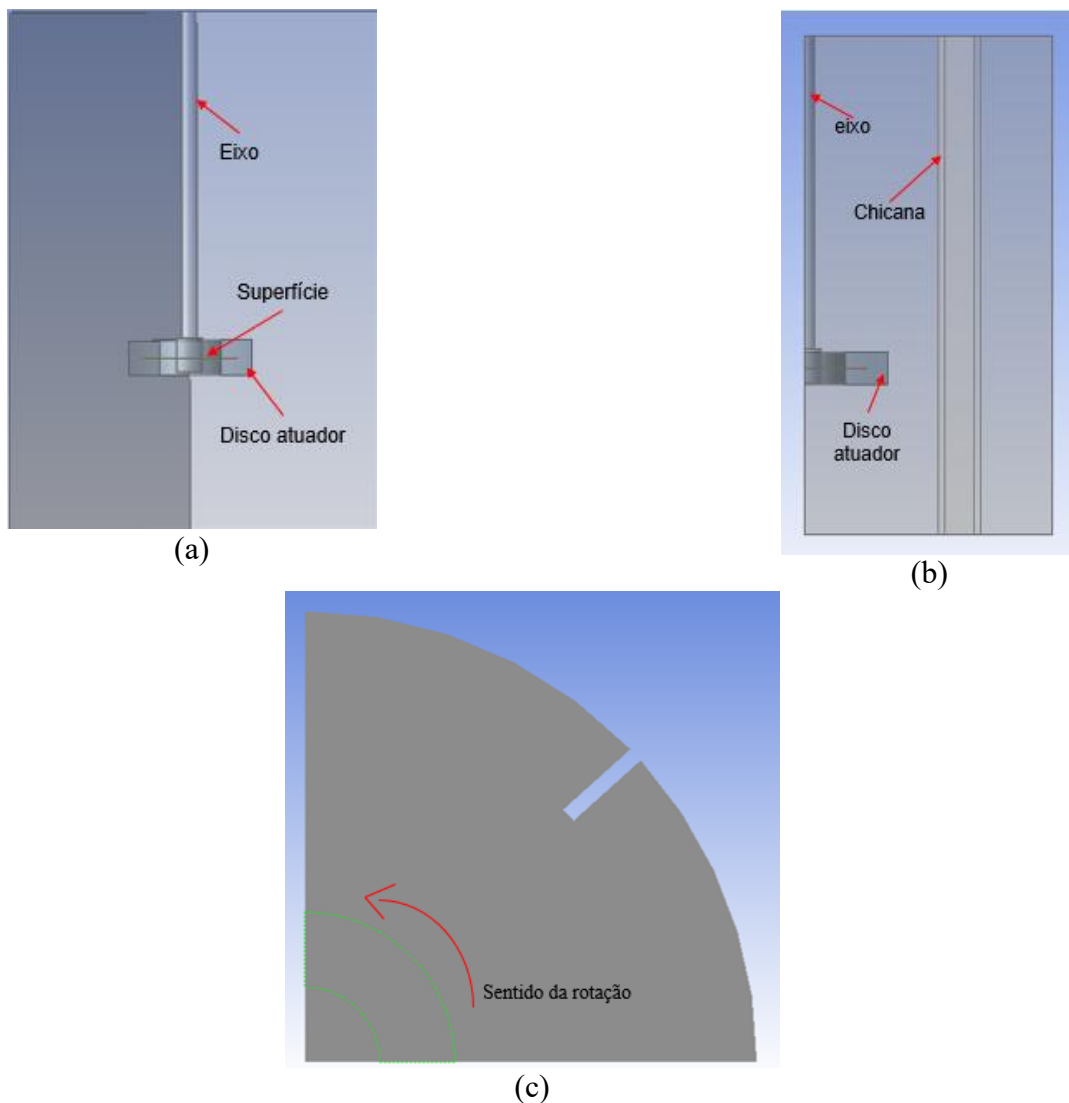


Figura 4.4 – Domínio computacional para o modelo de termo fonte. (a) visão frontal. (b) visão lateral.

4.2.3. Modelo com transporte de espécie

O modelo de transporte de espécie, presente no software FLUENT®, permite ao usuário prever a distribuição da fração de massa local, de uma ou mais espécies, com ou sem reações químicas, adicionadas ao sistema (FLUENT, 2009). Para tanto, o modelo de transporte de espécie é habilitado, e um novo material (fluido) com as mesmas propriedades do fluido dominante no tanque (água) é adicionado. Este novo fluido, é a espécie transportada com o escoamento do fluido principal, devendo a fração de massa do mesmo ser inicialmente igual a 1 na região escolhida para adicionar o traçador. Para este trabalho, o traçador é adicionado acima do impelidor, a partir de uma zona hexaédrica, como apresentado na Fig. 4.5. Estes mesmos parâmetros são seguidos em todas as simulações. Desta forma, a espécie definida é afetada pelo escoamento e distribuída em todo o tanque, onde a análise da distribuição da espécie, neste caso, é dada pelo desvio padrão da fração de massa:

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (y - y_0)^2}{n}} \quad (4.20)$$

onde y é o valor da variável na célula selecionada e y_0 é a média de y , dada por:

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^k y}{n} \quad (4.21)$$

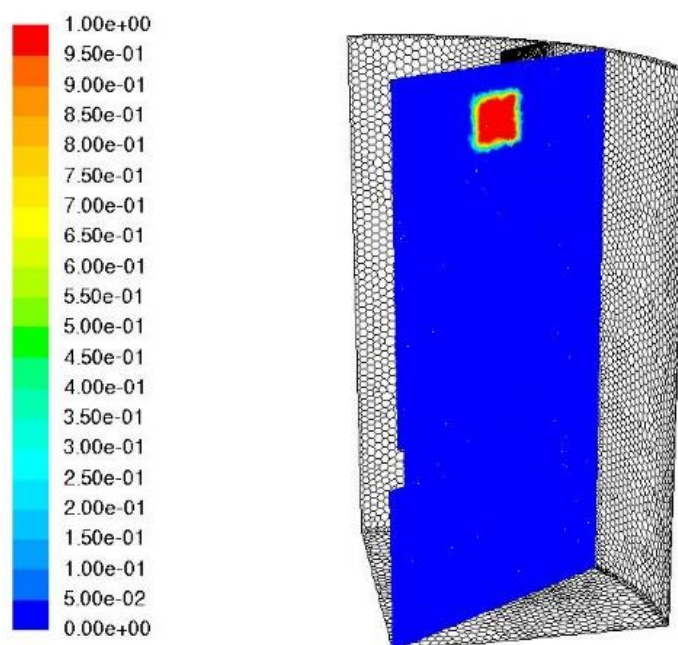


Figura 4.5 - Região inicializada com fração de massa igual a 1.

4.3. Verificação e validação dos modelos computacionais desenvolvidos

O software utilizado para as simulações numéricas do problema proposto é o FLUENT® 14.5, baseado no Método dos Volumes Finitos (MVF). Este software fornece recursos abrangentes para a modelagem de uma ampla gama de problemas envolvendo escoamentos com fluidos incompressíveis e compressíveis, laminares e turbulentos, sendo possível realizar análises tanto em regime estacionário como em regime transiente. Além disso, este software conta com uma boa capacidade em modelar geometrias complexas e possui modelos de turbulência robustos e precisos (FLUENT, 2009).

Para a solução de problemas em CFD, o domínio computacional (contínuo) deve ser discretizado, gerando uma malha numérica. A solução a partir da malha numérica, das equações que governam o fenômeno físico, dá origem a possíveis erros numéricos que em sua maioria são inevitáveis, já que a precisão de uma solução CFD é fortemente afetada pelo número de células da malha. Assim, em geral, quanto maior o número de células da malha, melhor a precisão da solução. Por outro lado, o custo computacional e o tempo de cálculo necessários para a resolução do problema, também estão fortemente ligados ao refinamento da malha. Desta forma, torna-se necessário desenvolver uma malha adequada que forneça confiança nos resultados, unindo precisão e o menor custo computacional possível (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2005).

Para obter resultados precisos com uma malha que não exija um esforço computacional muito alto, deve-se buscar uma “solução independente de malha”, isto é, uma solução que não se altera, dentro de algum critério de tolerância, quando a malha é refinada (FORTUNA, 2000). Neste trabalho, a convergência da malha é alcançada aplicando o método GCI, apresentado na próxima seção.

Assim, com a malha independente, é possível atestar o bom desempenho dos métodos numéricos utilizados para a solução das equações diferenciais, comparando a solução numérica com outras soluções numéricas e/ou analíticas (MALISKA, 2004). Para Versteeg e Malalasekera (2005) esta comparação é chamada de verificação, e isto determina se o modelo numérico está representando com precisão o problema físico e a sua solução. Ou seja, a verificação pode determinar se as equações do modelo matemático estão sendo resolvidas de forma que descrevam corretamente um comportamento físico já modelado anteriormente por outros autores.

O modelo de turbulência utilizado para este estudo é o $k - \epsilon$. Para o tratamento dos termos advectivos é utilizado o esquema *Upwind* de segunda ordem, para os termos de gradientes é

utilizado *Least Square Cell Based*. Já os termos transientes, são resolvidos utilizando uma formulação implícita de primeira ordem. Para o acoplamento pressão-velocidade é aplicado o algoritmo SIMPLE. A solução numérica é considerada convergente quando atingir valores residuais de 1×10^{-5} para todas as equações. A validação/verificação do modelo numérico é realizada em regime transiente com passo de tempo $\Delta t = 1 \times 10^{-3}$ s e com um total de 3500 passos de tempo. Já para avaliar a eficiência da mistura a partir da adição de um traçador, as simulações são realizadas considerando uma condição inicial convergida, em regime permanente e, então, simuladas em regime transiente com passo de tempo $\Delta t = 1 \times 10^{-3}$ s.

4.4. Método GCI - *Grid Convergence Index*

Uma das etapas mais importantes na simulação numérica é a verificação da convergência da malha. O grande desafio é encontrar uma malha suficientemente refinada para que os resultados gerados sejam fiéis à realidade sem que o custo computacional seja muito alto. Atingir esse equilíbrio é um problema a ser abordado verificando a malha. Em geral, há um momento em que, por mais refinada que seja a malha, os resultados numéricos ficam praticamente inalterados quando comparados a uma malha anterior (mais grosseira). Portanto, a malha mais grossa resolve o problema com um erro relativamente baixo e com muito menos esforço computacional (FORTUNA, 2000).

Em 2009, foi criado um método estatístico para quantificar a influência da discretização da malha em problemas numéricos. O método de verificação da solução numérica é baseado na técnica de *Grid Convergence Index* - GCI. A aplicação dessa técnica resulta em um índice que define o quanto a solução difere de uma malha computacional grosseira para uma mais refinada. Assim, para a aplicação deste método, são seguidos cinco passos, e todos os critérios de cálculo são definidos pela norma ASME V&V, (2009).

Passo 1: Definir uma célula representativa, malha ou tamanho de malha, h_m .

Passo 2: Selecionar três refinamentos de malha significativamente diferentes entre eles, e executar simulações para determinar os valores das variáveis mais importantes (φ). É desejável que o fator de refinamento da malha ($r_f = h_{m_{grosseiro}}/h_{m_{refinado}}$) seja maior que 1,3.

Passo 3: Fazer $h_{m_1} < h_{m_2} < h_{m_3}$ e $r_{f_{21}} = h_{m_2}/h_{m_1}$, $r_{f_{32}} = h_{m_3}/h_{m_2}$ e calcular a ordem aparente, p_o , do método

$$p_o = \left\lceil \frac{1}{\ln(r_{f_{21}})} \right\rceil [\ln|\gamma_{32} - \gamma_{21}| + q(p)] \quad (4.22)$$

$$q(p) = \ln\left(\frac{r_{f_{21}}^{p_o} - S}{r_{f_{32}}^{p_o} - S}\right) \quad (4.23)$$

$$S = 1.\text{sign}(\gamma_{32}/\gamma_{21}) \quad (4.24)$$

onde $\gamma_{32} = \varphi_3 - \varphi_2$, $\gamma_{21} = \varphi_2 - \varphi_1$. Este conjunto de três equações pode ser resolvido usando um cálculo iterativo com a estimativa inicial igual ao primeiro termo (ou seja, $q = 0$). Um mínimo de quatro iterações é necessário para demonstrar que a ordem observada, p_o , é constante para uma série de cálculos.

Passo 4: Calcular os valores extrapolados da equação

$$\varphi_{ext}^{21} = (r_{f_{21}}^{p_o} \varphi_1 - \varphi_2) / (r_{f_{21}}^{p_o} - 1) \quad (4.25)$$

Passo 5: Calcular as seguintes estimativas de erro junto com a ordem p observada. O erro relativo aproximado pode ser calculado de forma adimensional como

$$e_a^{21} = \left| \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\varphi_1} \right| \quad (4.26)$$

Finalmente, o *Grid Convergence Index* é dado por

$$GCI_{fine}^{21} = \frac{F_s \cdot e_a^{21}}{r_{21}^p - 1} \quad (4.27)$$

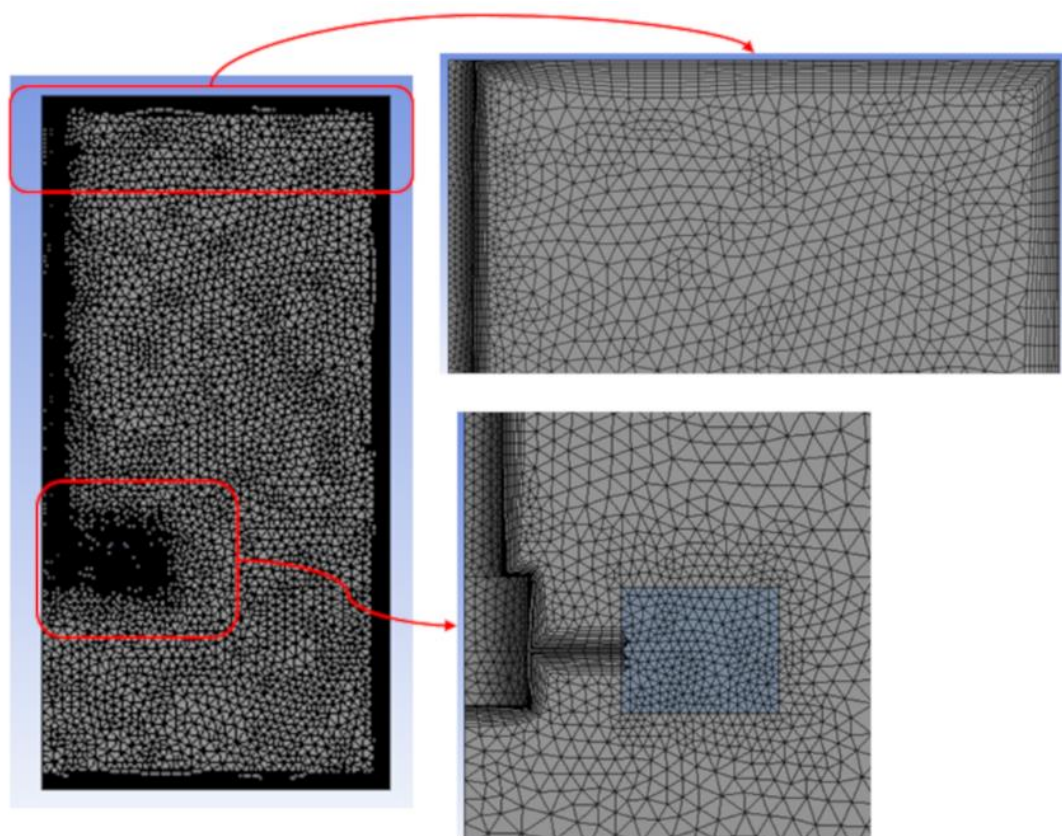
onde $F_s = 1,25$ é uma constante definida.

Para o presente trabalho, a aplicação do método GCI é apresentada na Tab. 4.2.

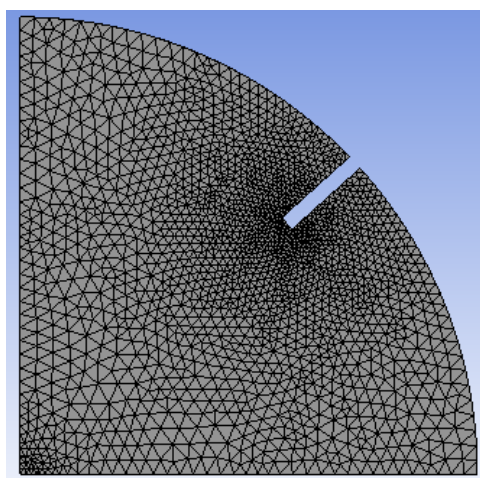
Tabela 4.2 - Aplicação do método GCI.

Malha 1	Malha 2	Malha 3	$r_{f_{32}}$	$r_{f_{21}}$	p_o	GCI (%)
5.484.258	1.878.417	610.767	1,45	1,42	2,82	0,1027

Assim, a malha com solução convergente possui 1.878.417 elementos e pode ser vista na Fig. 4.6.



(a)



(b)

Figura 4.6 - Malha independente escolhida a partir do método GCI. (a) visão lateral. (b) visão superior.

5. RESULTADOS

Os resultados deste trabalho referem-se às soluções numéricas obtidas através de simulações utilizando a metodologia e os recursos computacionais já mencionados anteriormente.

5.1. Verificação e Validação do modelo numérico

Para a verificação do modelo numérico com termo fonte é utilizada a malha com solução independente contendo 1.878.417 elementos Fig. 4.6. Já para o modelo com malha móvel, é utilizada uma malha com 586.483 elementos Fig. 5.1. Para esta malha não é realizado o teste de convergência de malha, considerando o alto custo e tempo computacional que o mesmo exigiria. No entanto, o tamanho da malha segue parâmetros apresentados na literatura, utilizando o modelo de malha móvel (HUANG; LI, 2013; JAVED *et. al.*, 2006).

Tanto as simulações com o modelo de termo fonte, quanto as simulações com o modelo de malha móvel são executadas em regime transiente com 3500 passos de tempo de magnitude $\Delta t = 1 \times 10^{-3}$ s. Os dois modelos são simulados considerando um regime de escoamento transiente e turbulento, com número de Reynolds de 47.790 ($Re_D = \rho ND^2/\mu$), o que corresponde à uma velocidade do impelidor de $N = 300$ rpm (5 rps).

Os resultados obtidos dos campos de velocidade e da energia cinética turbulenta são comparados com resultados numéricos e experimentais encontrados no trabalho de Javed et al. (2006). A apresentação dessa comparação tem o intuito de mostrar o nível de concordância alcançado entre os resultados com modelo de malha móvel e com o modelo de termo fonte (desenvolvidos para o presente trabalho), bem como, o nível de concordância dos resultados encontrados na literatura. São apresentados resultados com relação às características dos perfis de velocidade média axial, radial e tangencial, bem como, da turbulência. As velocidades foram normalizadas com o $V_{tip} = 1,54$ m/s ($V_{tip} = \pi DN$).

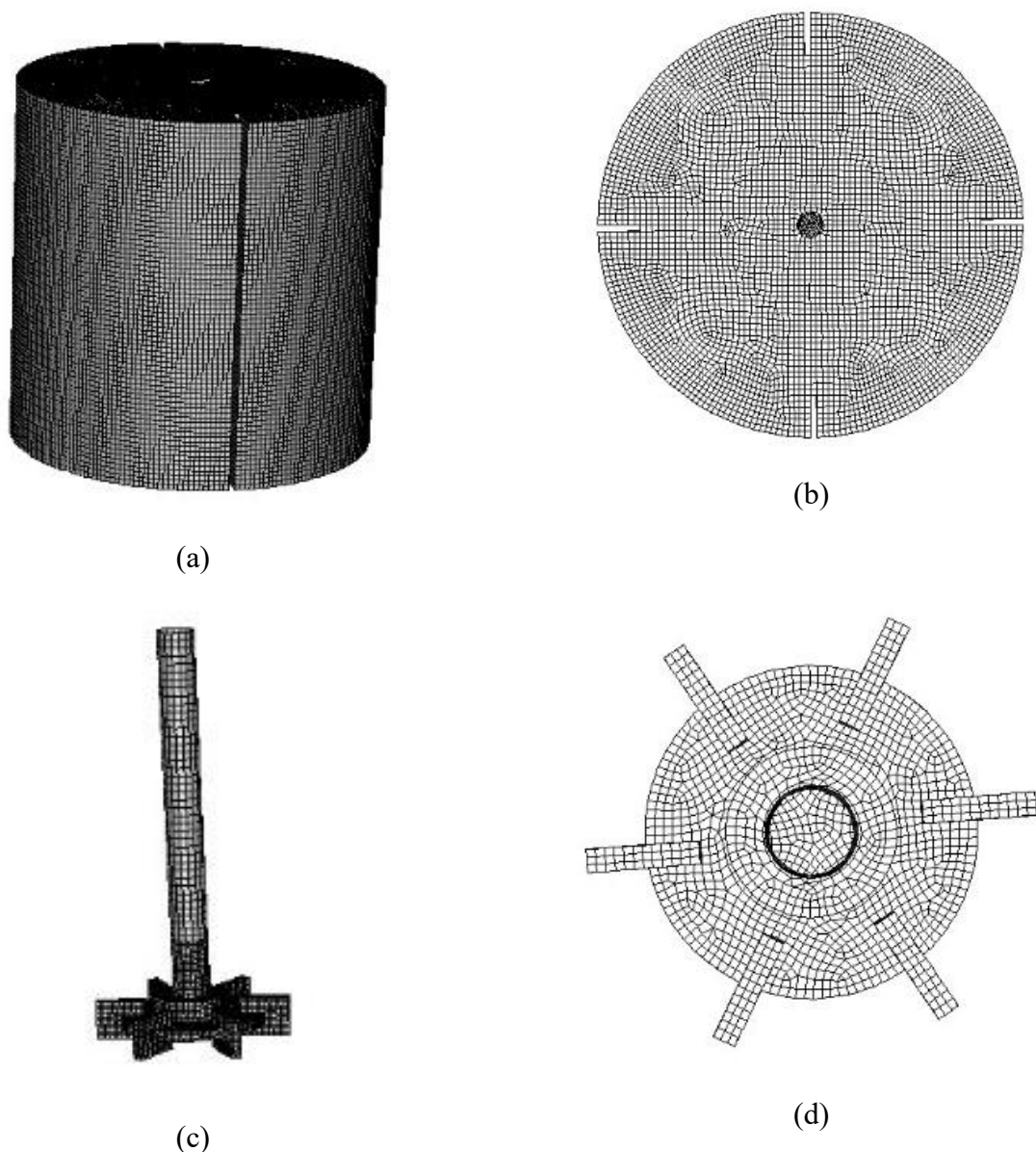


Figura 5.1 - Malha utilizada no modelo de malha móvel. (a) Visão lateral do tanque. (b) Visão superior do tanque. (c) Visão geral do impelidor. (d) Visão superior do impelidor.

Primeiramente, é analisado qualitativamente o campo vetorial médio para ambos os modelos numéricos, modelo de malha móvel Fig. 5.2(b) e modelo com termo fonte Fig. 5.2(c). Os resultados são comparados com o resultado apresentado por Huang e Li (2013), Fig. 5.2(a). A visualização do escoamento é obtida através de um plano vertical criado a partir do eixo do impelidor até o ponto médio de duas chicanas do tanque. Observa-se, nas Figs. 5.2(b)-(c), que nos dois casos, o escoamento avança na direção radial a partir do impelidor até atingir a parede do tanque. Após, a velocidade do escoamento diminui e este se separa em duas correntes, para cima e para baixo. Logo, o escoamento circula pelo tanque até voltar para a região do impelidor, repetindo o processo mencionado. Nota-se

ainda, que a região acima do impelidor possui uma recirculação mais suave do que a região abaixo do impelidor. Este comportamento era esperado, já que o impelidor está mais próximo do fundo do tanque, e isso faz com que a recirculação neste local seja mais evidente.

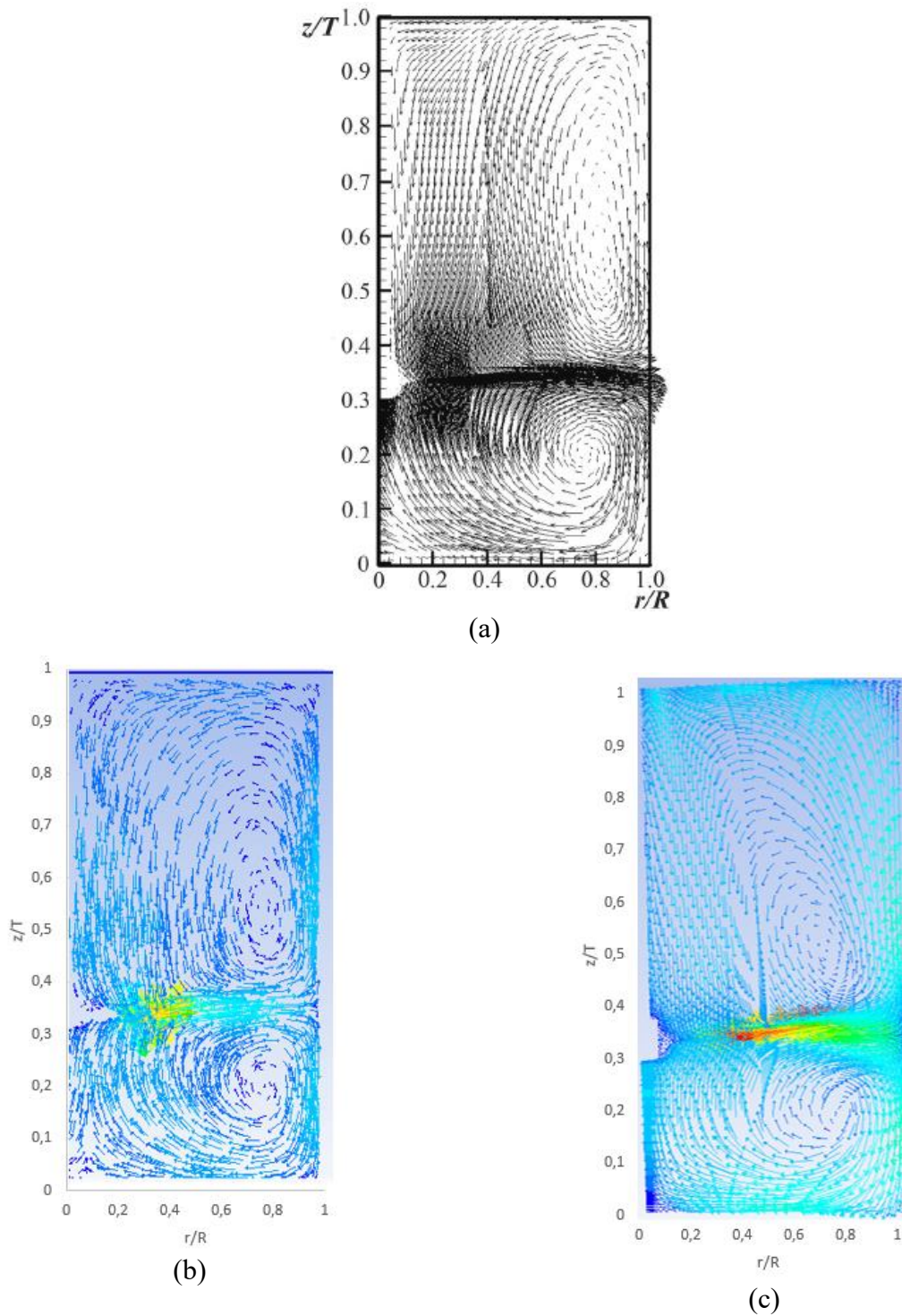


Figura 5.2 - Campo vetorial. (a) Huang e Li (2013). (b) Modelo de malha móvel. (c) Modelo de termo fonte.

Os resultados obtidos com as simulações numéricas utilizando os modelos de malha móvel e o modelo com termo fonte são comparados com os resultados mostrados no estudo de Javed *et. al.*, (2006). As Figuras 5.3(a)-(b) mostram os monitores, em diferentes alturas e em diferentes posições radiais, utilizados para obtenção dos resultados que são comparados com os da literatura.

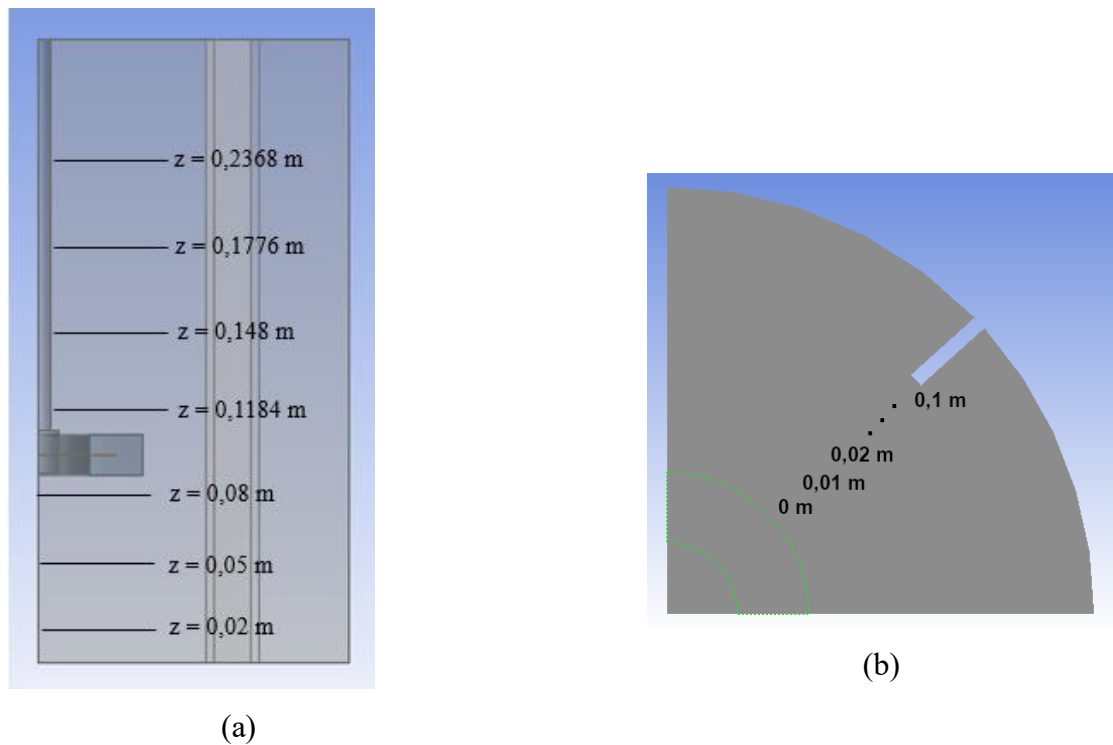


Figura 5.3 – Monitores. (a) Monitores em diferentes alturas. (b) Monitores em diferentes posições radiais.

Nas Figuras 5.4 e 5.5 é possível observar o perfil da velocidade média axial em diferentes alturas com componente radial variável.

Percebe-se, a partir dos gráficos mostrados nas Figs. 5.4 e 5.5, que as velocidades axiais nas localizações $z = 0,02$; $z = 0,05$; $z = 0,08$ (abaixo do impelidor) possuem valores positivos, ao contrário das localizações $z = 0,148$; $z = 0,1184$; $z = 0,1776$; $z = 0,2368$ (acima do impelidor) que possuem valores negativos. Este resultado era esperado, já que, há uma mudança na direção do escoamento acima e abaixo do impelidor, o que pode ser observado nas Figuras 5.2(b)-(c), onde são mostrados os vetores apontando para cima quando estão na parte inferior do impelidor, e apontando para baixo, quando estão na parte superior do impelidor.

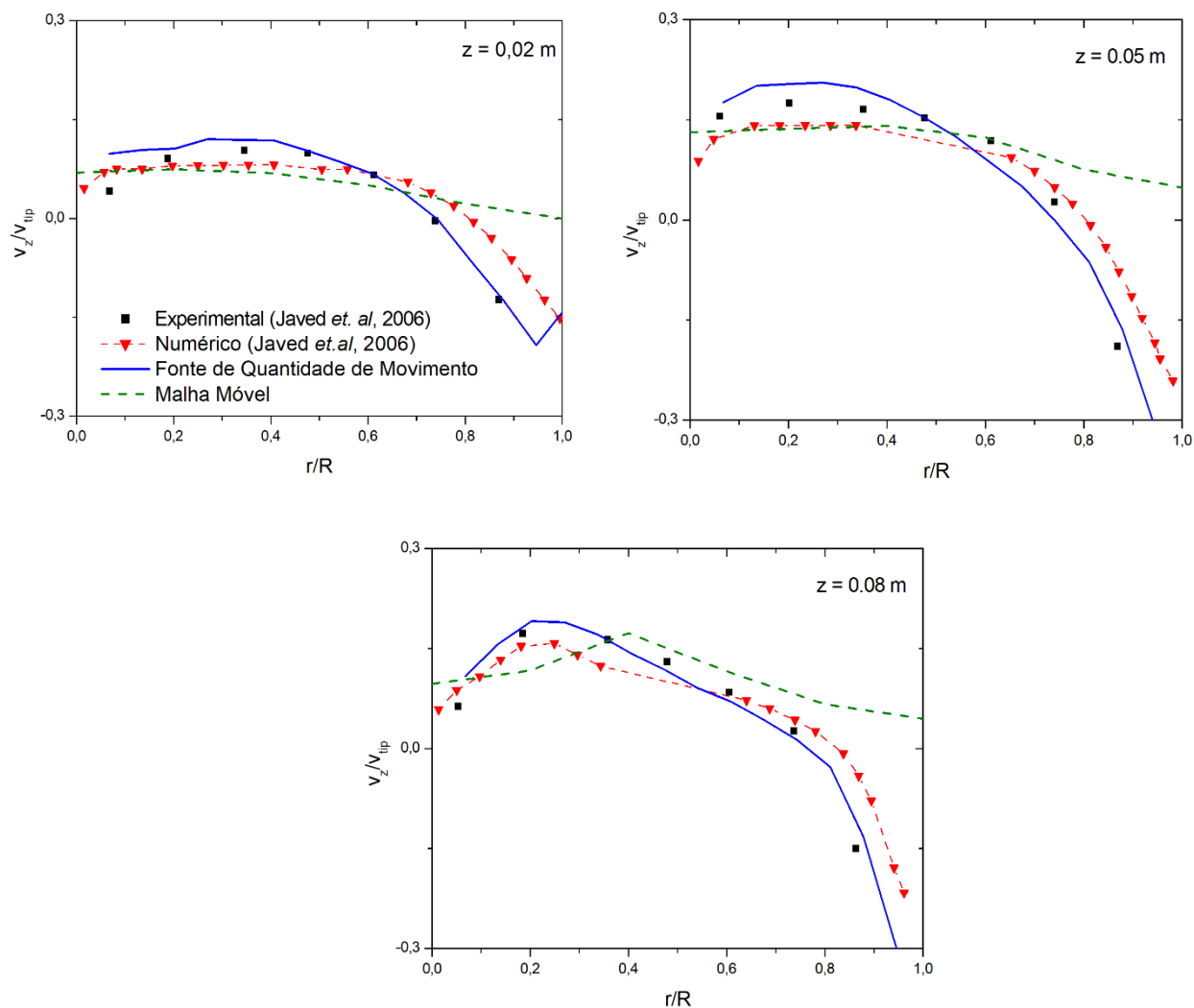


Figura 5.4 - Comparação de resultados para a velocidade axial abaixo do impelidor.

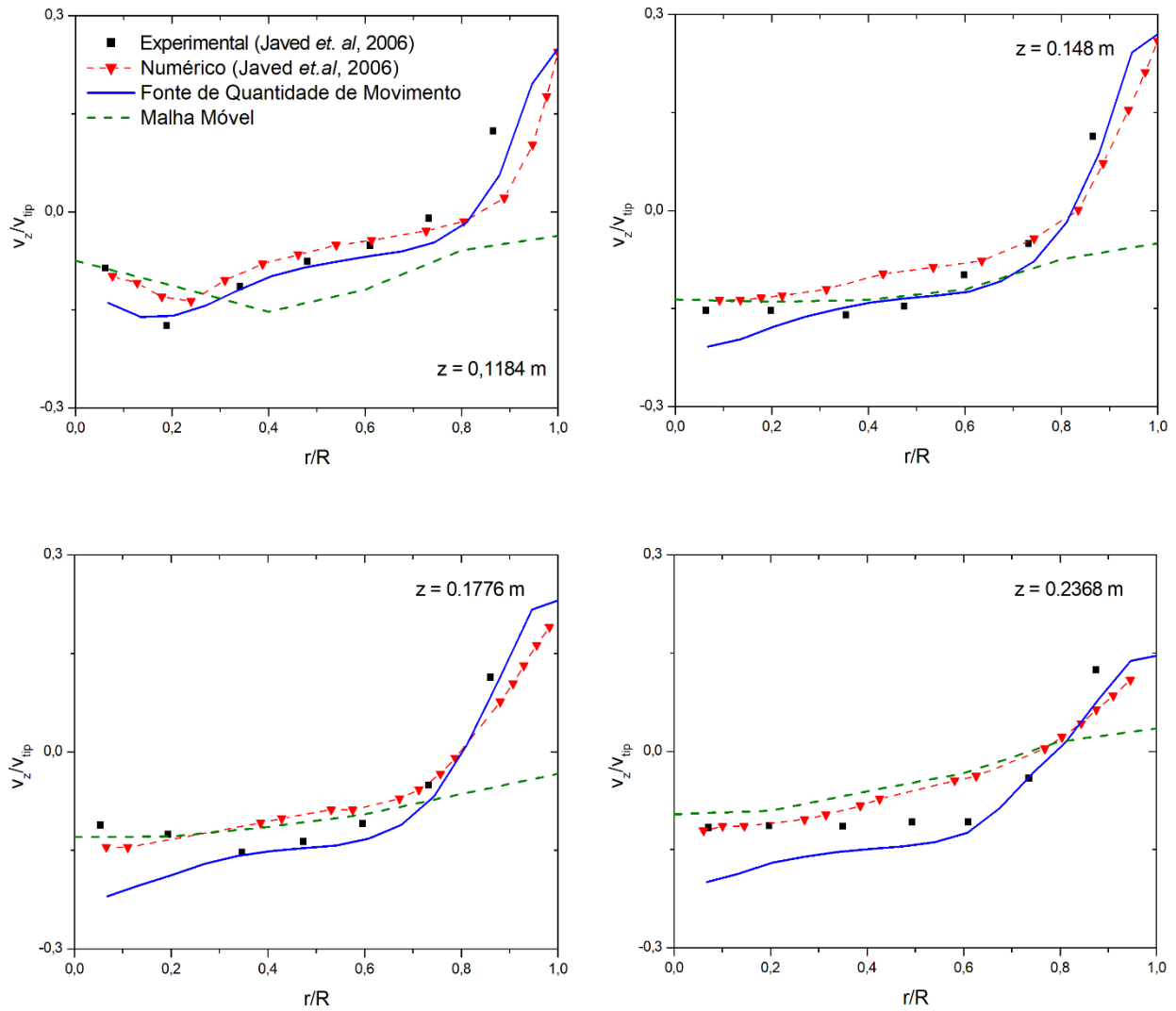


Figura 5.5 - Comparação de resultados para a velocidade axial acima do impelidor.

As Figuras 5.6 e 5.7 mostram a média temporal da velocidade radial também em diferentes alturas e com componente radial variável. Percebe-se que, as velocidades radiais apresentam um pico máximo entre as razões 0,5 e 0,8 ainda próximo ao impelidor. Posteriormente, as velocidades começam a diminuir até alcançar zero à medida que chegam próximo da parede do tanque.

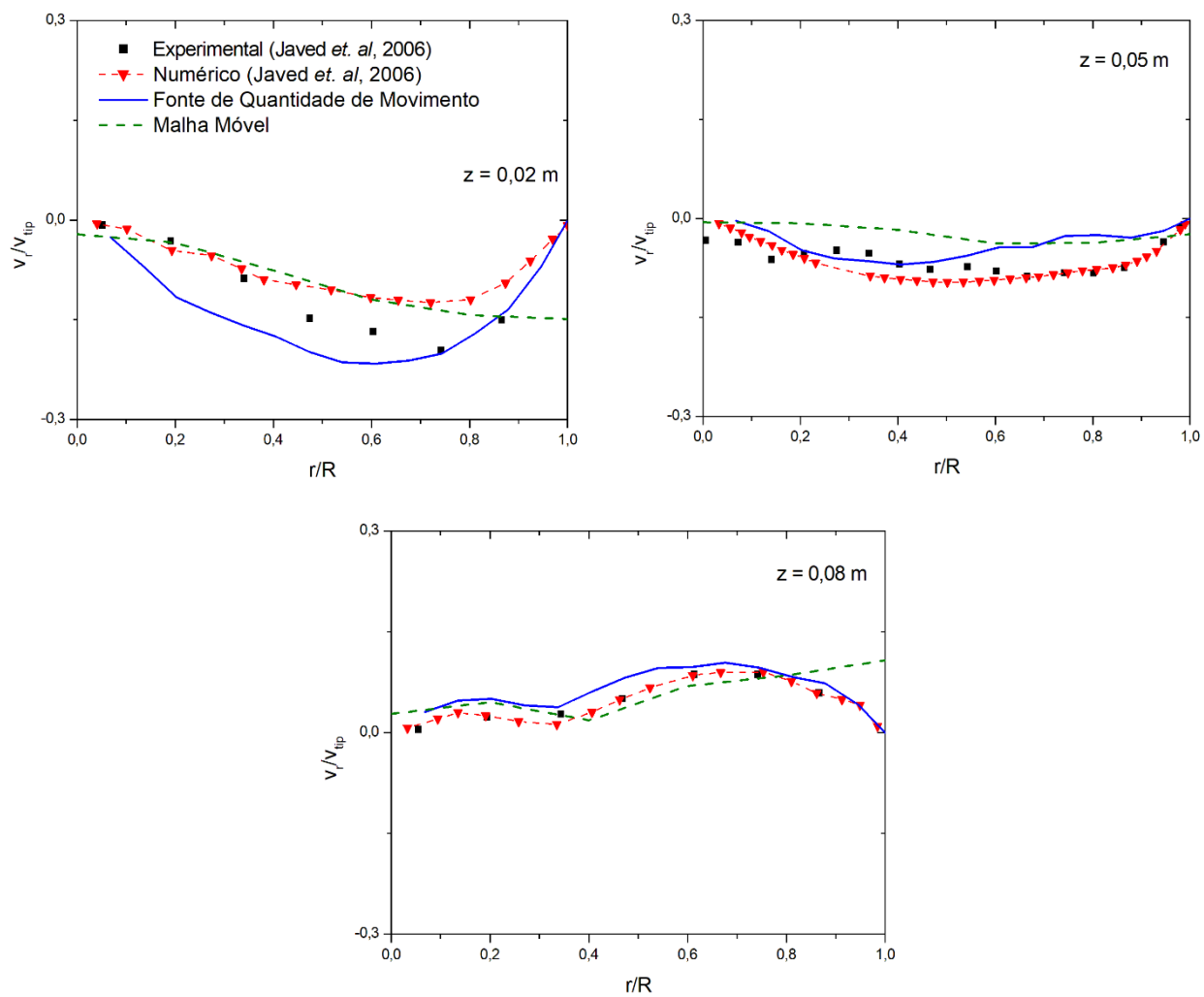


Figura 5.6 - Comparação de resultados para a velocidade radial abaixo do impelidor.

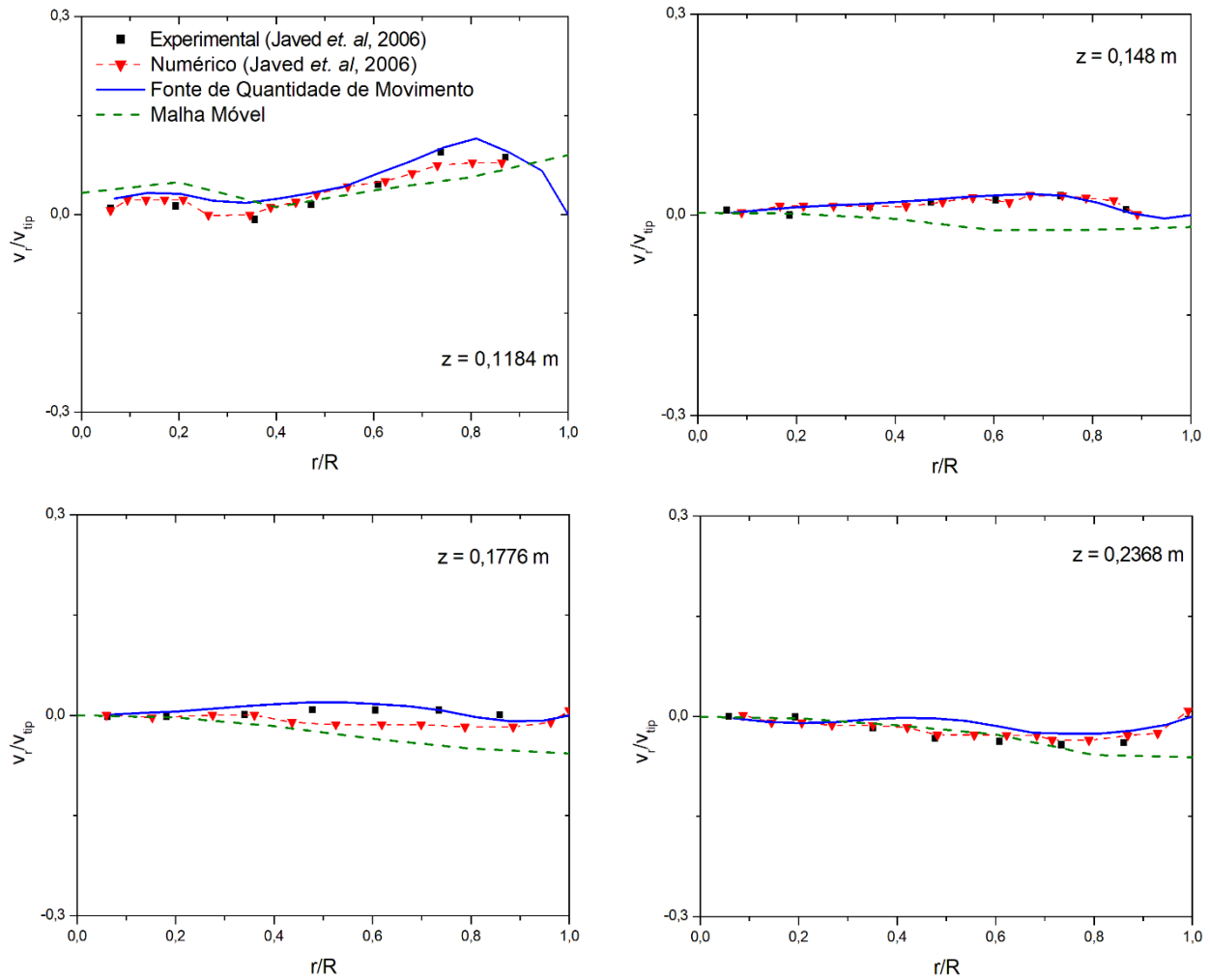


Figura 5.7 - Comparação de resultados para a velocidade radial acima do impelidor.

Na Figura 5.8 são apresentados os resultados da velocidade média tangencial, neste caso, não é realizado monitoramento da velocidade tangencial acima do impelidor, já que estes resultados não foram apresentados por Javed *et al.* (2006). Percebe-se na Fig. 5.8 que a média temporal da velocidade tangencial aumenta até aproximadamente a razão 0,5, após, apresenta uma pequena queda, e então volta a subir. Este mesmo comportamento é apresentado nas três localizações abaixo do impelidor.

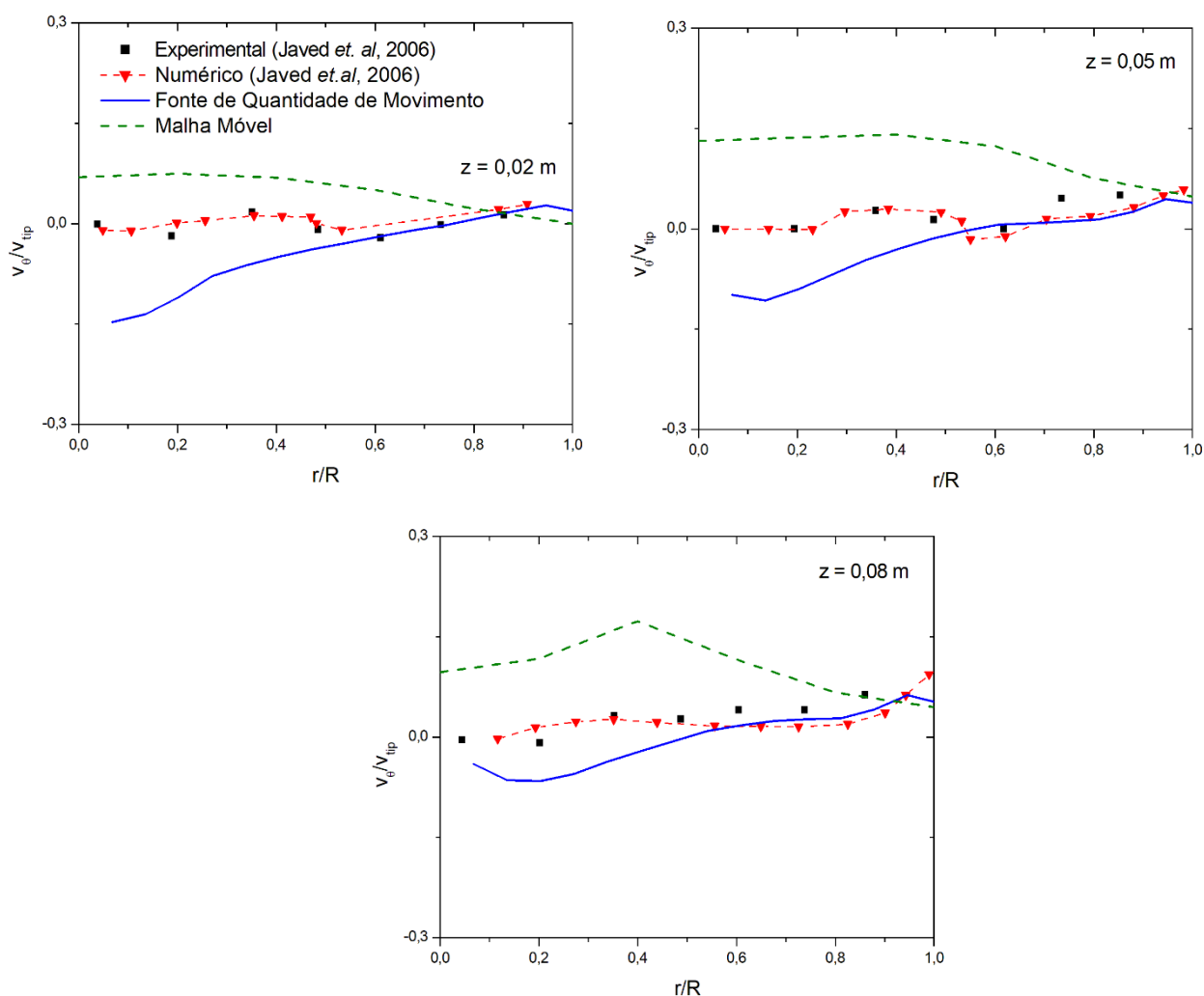


Figura 5.8 - Comparação de resultados para a velocidade tangencial abaixo do impelidor.

A seguir, é possível observar as comparações com relação às previsões da energia cinética da turbulência Figs. 5.9-5.10. Percebe-se que, mais próximo da ponta do impelidor (entre as razões 0,5 e 0,7 aproximadamente) existe uma turbulência maior no escoamento.

Os resultados apresentados até o momento, mostraram algumas discrepâncias referentes à comparação dos modelos numéricos, desenvolvidos para este trabalho, com os resultados experimentais apresentados na literatura. Contudo, a comparação entre os modelos numéricos, desenvolvidos para este trabalho, e os resultados numéricos de Javed et al. (2006) se mostrou bastante concordante na maior parte dos casos. Algumas discrepâncias podem ser notadas nos gráficos da velocidade tangencial e da energia cinética de turbulência. Isso pode estar ocorrendo pelo fato de que o modelo não considera as fronteiras físicas do impelidor, o que acaba perdendo informações sobre a turbulência, e também não está sendo considerado nenhum termo fonte de potência que pudesse suprir a falta das fronteiras físicas do impelidor. Ou seja, as magnitudes e as características dos perfis de

velocidade são geralmente bem reproduzidas pelos modelos numéricos desenvolvidos, com algumas poucas exceções. Portanto, pode-se considerar que os modelos numéricos foram verificados.

Outra questão importante a ser destacada, é com relação ao tempo de processamento entre os dois modelos numéricos desenvolvidos. Observa-se que o modelo numérico utilizando malha móvel, exige um esforço computacional maior do que o modelo numérico utilizando o termo fonte. Isto é, o tempo computacional exigido para simular os mesmos 3,5 s para os dois modelos adotados foi de 240 h para o modelo com malha móvel e 5 h para o modelo com termo fonte. Assim, o modelo com termo fonte exige cerca de 2% do esforço computacional requerido com o modelo que utiliza malha móvel.

Todas as simulações são executadas em uma máquina que possui um total de 12 núcleos, processador Intel Core i-7, sistema operacional de 64 Bits, memória RAM de 16 GB e *clock* 3.5 GHz. Por questões operacionais, são utilizados 4 núcleos do total de 12 para simular cada caso.

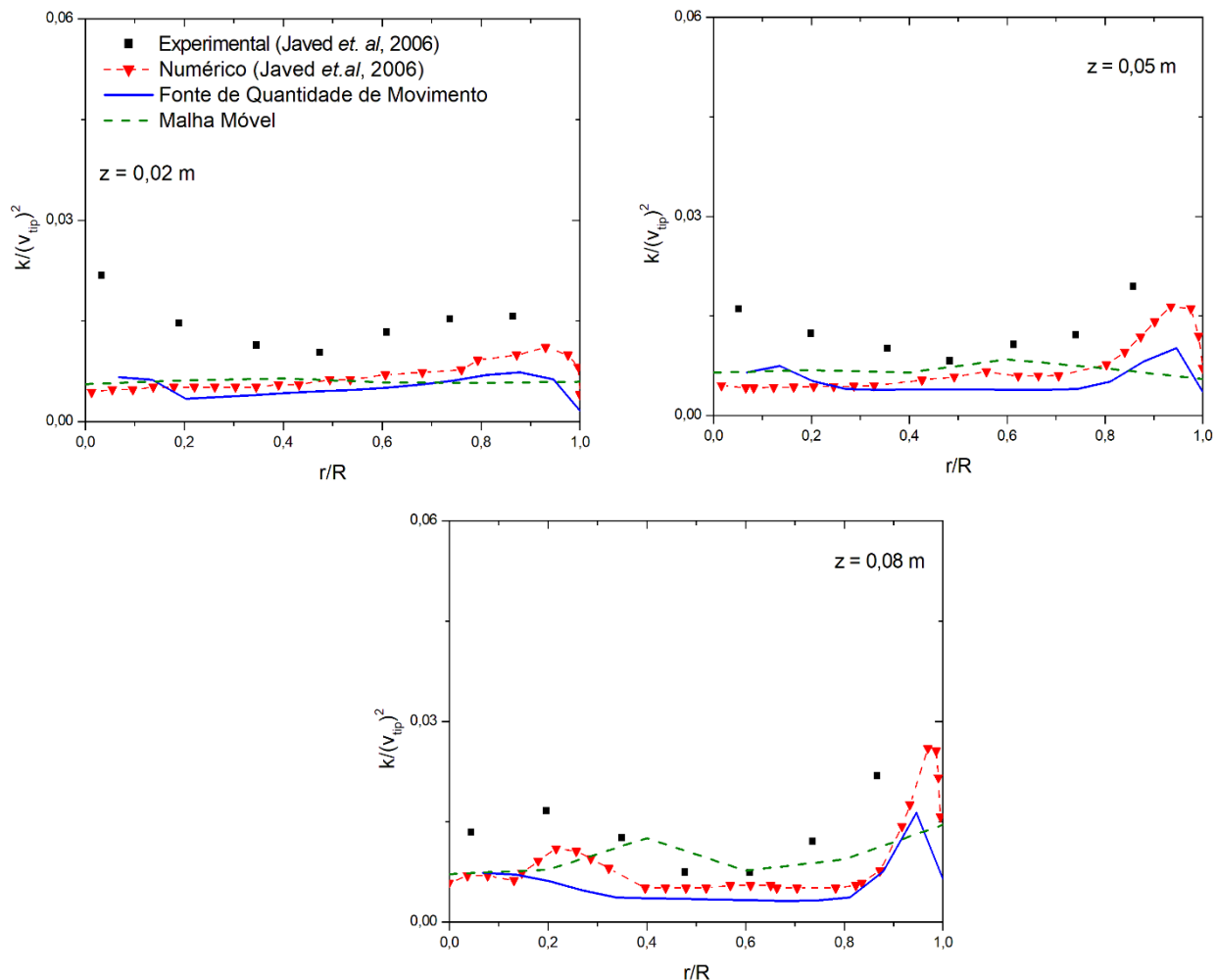


Figura 5.9 - Resultados da energia cinética da turbulência abaixo do impelidor.

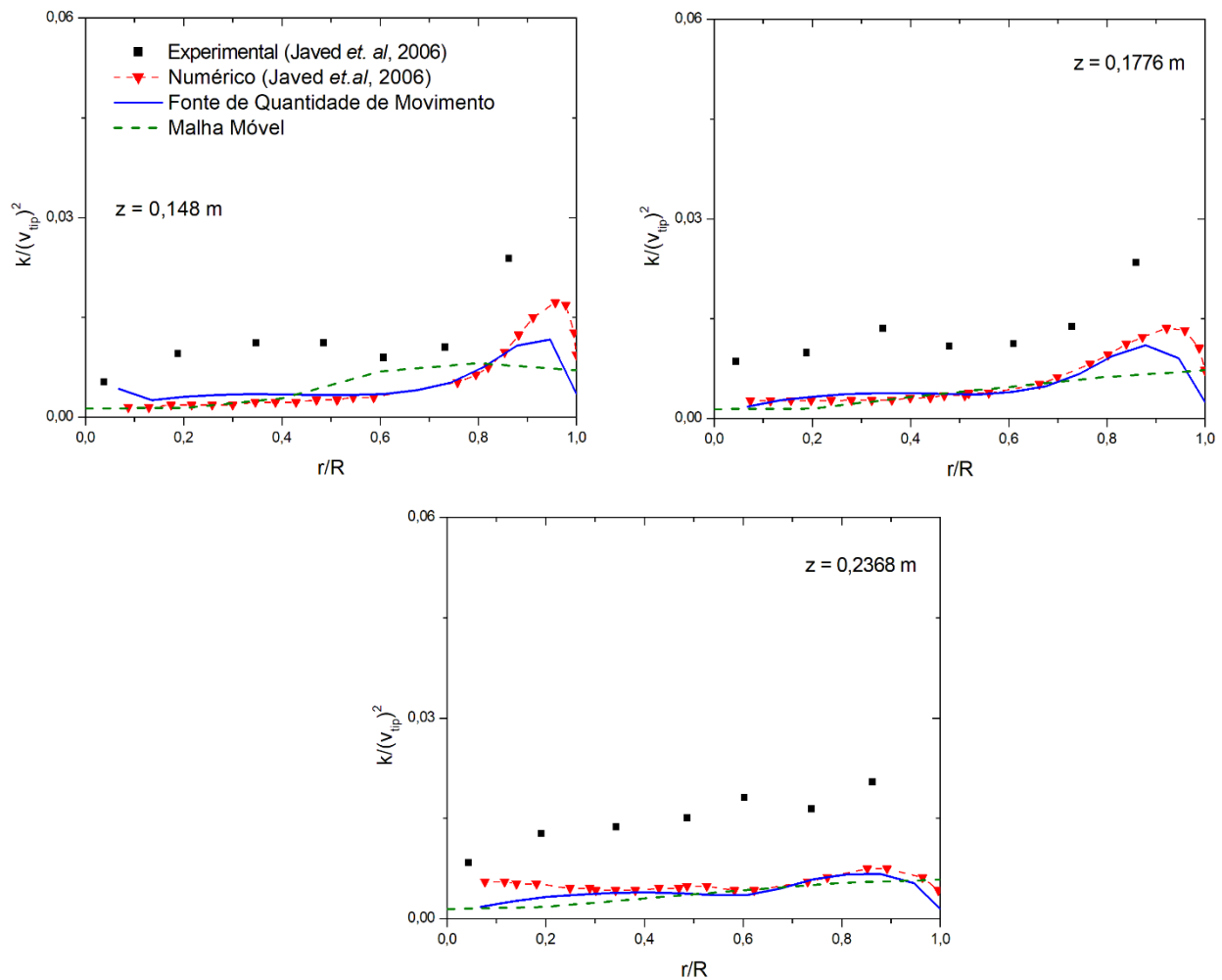


Figura 5.10 – Resultados da energia cinética da turbulência acima do impelidor.

Por questões de esforço e tempo computacional, todos os próximos resultados apresentados referem-se ao modelo que utiliza o termo fonte de quantidade de movimento.

5.2. Aplicação do Design Construtal ao Problema

Com os objetivos e as restrições bem definidas, como apresentado na seção 4.1.2, pode-se dar início à busca pela geometria que apresenta a melhor performance do sistema. Neste caso, a busca se dá pela contribuição de um método de otimização, Busca Exaustiva, que tem o objetivo de testar as possibilidades apresentadas a partir da aplicação do método Design Construtal, em busca da melhor performance. Para alcançar este objetivo, é realizado um conjunto de 7 simulações variando a razão L/B e mantendo fixa a quantidade de chicanas para cada caso. Considerando avaliar casos com 4, 6 e 8 chicanas, tem-se um total de 21 simulações. O processo de busca pela melhor geometria, gera uma

“árvore de simulações” que pode ser observada na Fig. 5.11. Cada razão L/B representa as dimensões das chicanas no interior do tanque misturador, onde a maior razão ($L/B = 1$) representa a chicana com menor comprimento (mais distante do impelidor), ao passo que, a menor razão ($L/B = 0,02; 0,015; 0,01$, para 4, 6 e 8 chicanas, respectivamente) representa a chicana com maior comprimento (mais próxima do impelidor). Percebe-se que, as razões L/B não são iguais para as diferentes quantidades de chicanas. Isso acontece porque, com a variação do número de chicanas, a área de cada chicana varia também, afetando a razão de L/B que conduz a maior distância entre a superfície do tanque e o impelidor. Assim, torna-se necessário que cada uma das quantidades de chicanas tenha suas razões L/B individuais.

Cada geometria gerada com a variação das razões L/B pode ser vista nas Figs. 5.12, 5.13 e 5.14.

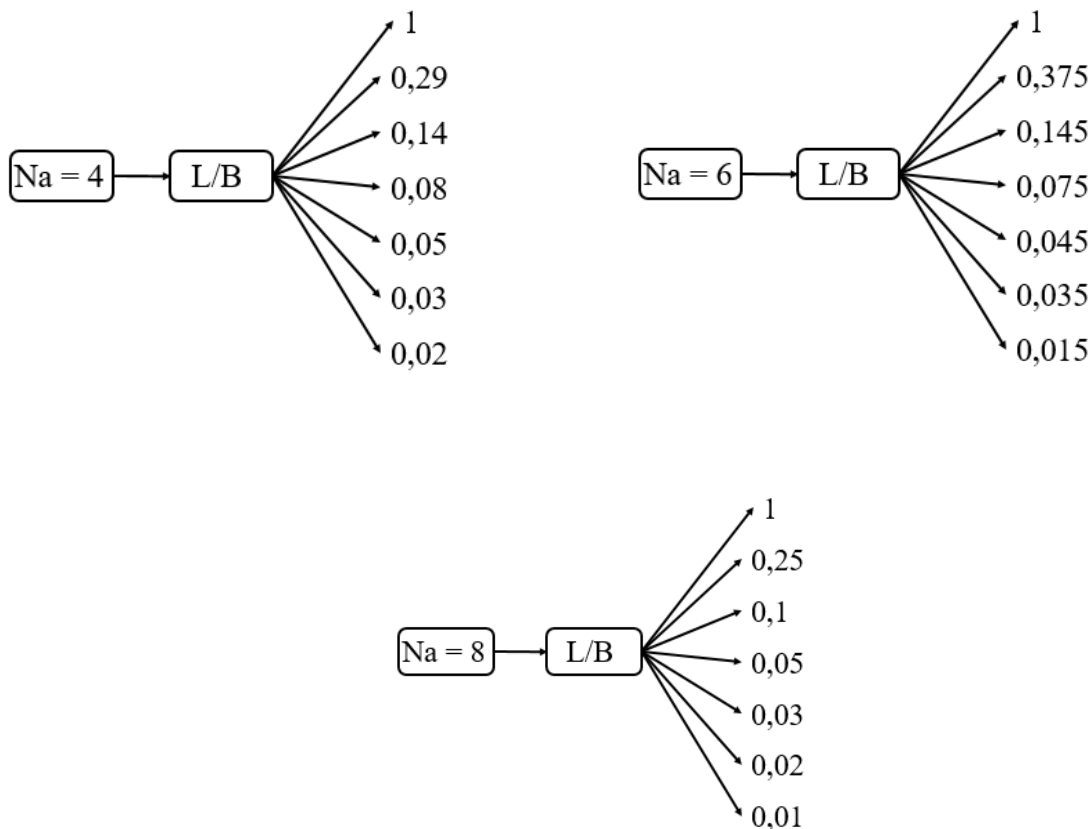


Figura 5.11 - Árvore de simulações do método Design Construtal.

Nas Figuras 5.12, 5.13 e 5.14 é possível observar que as geometrias do tanque estão sendo apresentadas com o domínio computacional completo. A visualização da geometria nesta forma, auxilia no entendimento da evolução dimensional das chicanas, bem como, das diferentes quantidades

da mesma no interior do tanque. No entanto, cabe ressaltar que todas as simulações foram realizadas utilizando apenas parte do domínio computacional, como já mencionado anteriormente. Para os casos com 4 e 8 chicanas, é utilizado 1/4 do domínio, já para o caso de 6 chicanas é utilizado 1/6 do domínio.

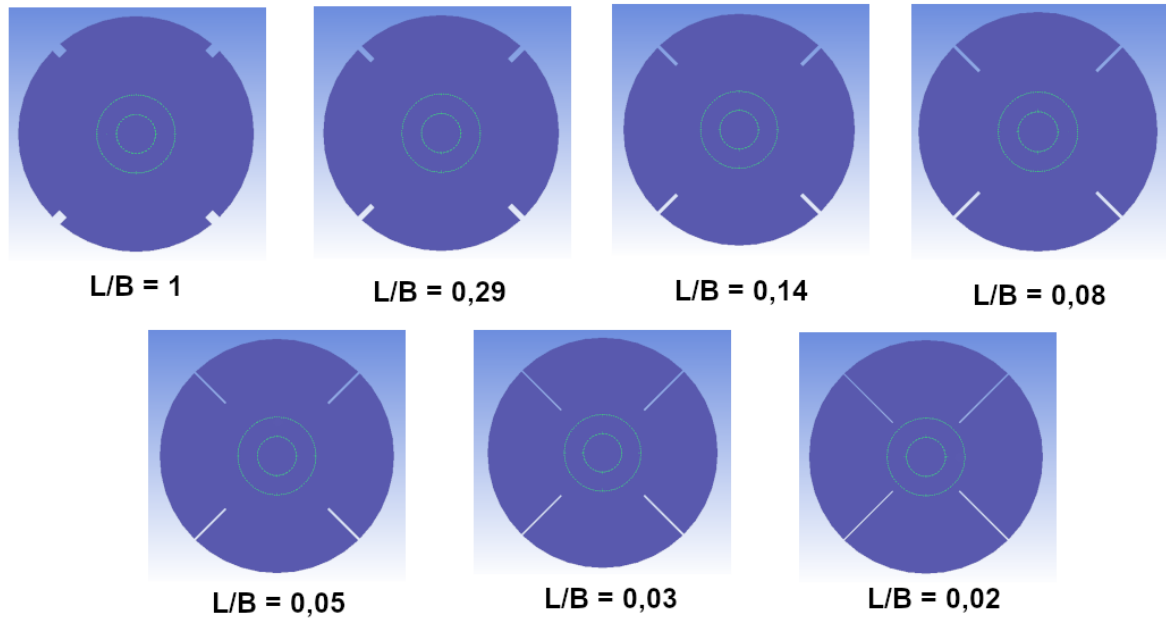


Figura 5.12 - Geometrias obtidas com a aplicação do Design Construtal para o caso com 4 chicanas.

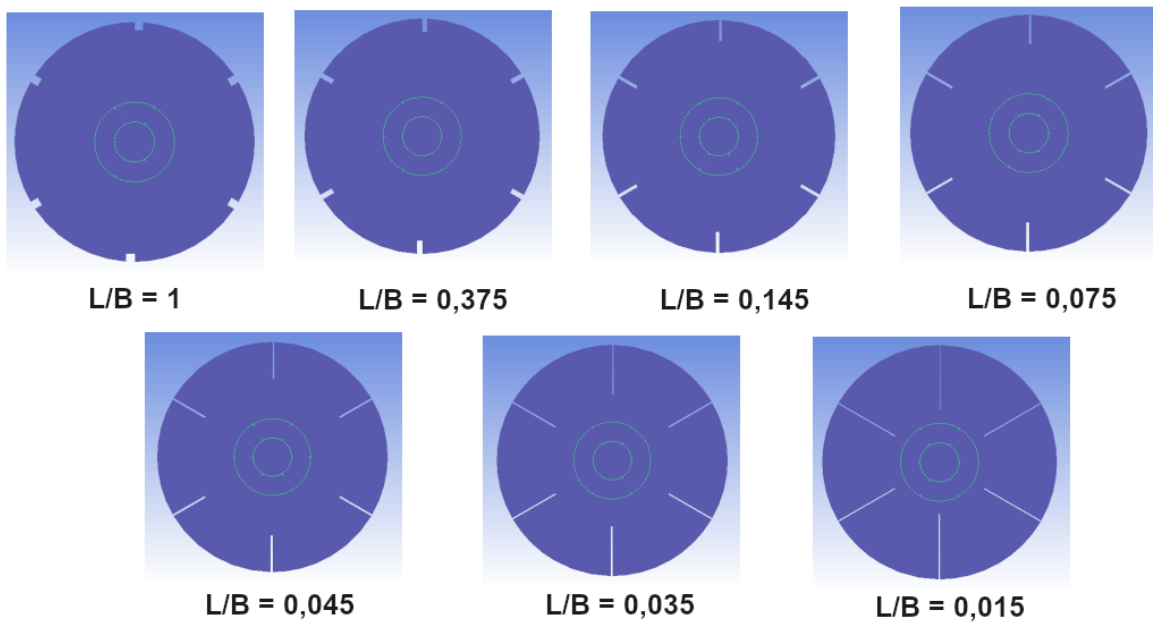


Figura 5.13 - Geometrias obtidas com a aplicação do Design Construtal para o caso com 6 chicanas.

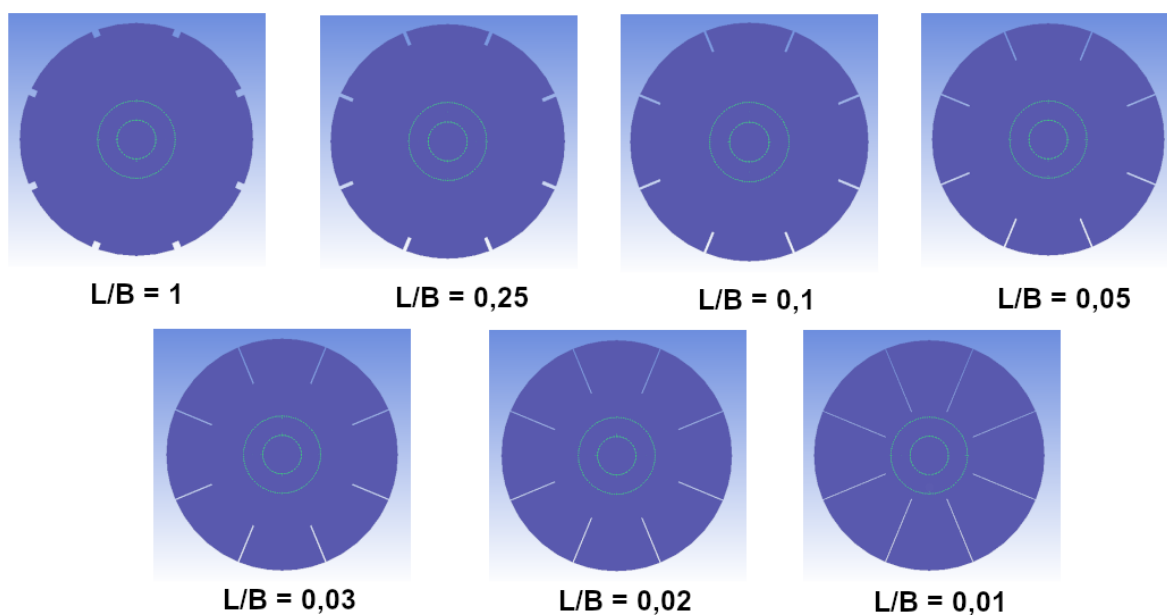


Figura 5.14 - Geometrias obtidas com a aplicação do Design Construtal para o caso com 8 chicanas.

5.3. Influência das diferentes configurações geométricas e quantidade das chicanas sobre o escoamento e o tempo da mistura

A fim de explorar o modelo desenvolvido, as recomendações geométricas propostas com a aplicação do Design Construtal, são submetidas às simulações numéricas com o intuito de avaliar a influência da dimensão das chicanas sobre o escoamento e sobre a mistura. Os casos estudados possuem as mesmas dimensões do tanque mostrado anteriormente na Fig. 4.2 . A única diferença aqui, é a dimensão das chicanas.

As simulações são primeiramente executadas em regime permanente, com o intuito de economizar tempo e esforço computacional, já que, neste primeiro momento é avaliado apenas o comportamento do escoamento (campos de velocidade e turbulência). Assim que alcançada a convergência numérica, um traçador é inserido no fluido, e as simulações passam a ser executadas em regime transiente, a fim de estudar a mistura a partir da distribuição do traçador no volume do tanque com o tempo.

Para avaliar a influência das chicanas sobre o escoamento, são consideradas as magnitudes médias da energia cinética da turbulência no sistema. Considera-se que maiores magnitudes da energia cinética de turbulência representam configurações com maior influência sobre o escoamento

do fluido e o processo de mistura. Na Tabela 5.1, com os resultados apresentados, fica claro que existe uma influência considerável no escoamento quando a geometria das chicanas é modificada.

Tabela 5.1 - Média temporal da energia cinética de turbulência para diferentes razões L/B e diferentes quantidade de chicanas.

Sem chicanas	4 chicanas		6 chicanas		8 chicanas	
$K (m^2/s^2)$	L/B	$K (m^2/s^2)$	L/B	$K (m^2/s^2)$	L/B	$K (m^2/s^2)$
0,041	1	0,028	1	0,026	1	0,025
	0,29	0,021	0,375	0,021	0,25	0,018
	0,14	0,018	0,145	0,017	0,1	0,016
	0,08	0,017	0,075	0,017	0,05	0,015
	0,05	0,020	0,045	0,017	0,03	0,015
	0,03	0,023	0,035	0,018	0,02	0,014
	0,02	0,026	0,015	0,017	0,01	0,014

Nos resultados apresentados na Tab. 5.1, pode-se observar que a média da energia cinética da turbulência produz um valor maior para o tanque sem chicanas. Quando as chicanas são inseridas no tanque, utilizando a primeira razão $L/B = 1$, já é possível notar uma grande influência sobre o escoamento com a presença das mesmas. Assim, conforme as chicanas crescem e se aproximam do centro do tanque (próximo ao impelidor) a turbulência diminui. Este comportamento pode ser observado para todas as quantidades de chicanas. Logo, o maior valor da energia cinética de turbulência foi encontrado para o caso com razão $L/B = 1$ para todas as quantidades de chicanas. Além disso, o caso que apresentou a maior energia cinética de turbulência, foi o caso com 4 chicanas.

Ainda observando a Tab. 5.1 e comparando a mesma com a Fig. 5.15 é possível observar que mesmo o caso sem chicanas possuindo o maior valor da energia cinética de turbulência, esta não é bem distribuída no domínio do tanque, apresentando sua maior concentração na região mais próxima do impelidor. Este comportamento não gera uma boa mistura, já que o fluido não será afetado em todo o domínio do tanque.

Nas próximas subseções, a influência das chicanas no escoamento e na mistura é analisada caso a caso.

5.3.1. Tanque com 4 chicanas

A Figura 5.15 apresenta a média temporal da energia cinética de turbulência para o tanque com 4 chicanas em um plano na região do impelidor. Nota-se uma distribuição mais homogênea da energia cinética de turbulência para o caso com $L/B = 0,14$. Por outro lado, o caso $L/B = 1$ produz maiores valores de turbulência seguido do caso sem chicanas. Além disso, a partir da razão $L/B = 0,05$ até $L/B = 0,02$ observa-se o pior comportamento do escoamento com relação à turbulência.

No caso sem chicanas, há maior magnitude da energia cinética da turbulência, com elevada magnitude próximo ao impelidor e magnitude muito baixa na região da periferia. Conforme há redução da razão L/B , a distribuição entre a máxima e mínima energia cinética da turbulência é mais equilibrada até o ponto em que o aumento do comprimento das chicanas começam a formar uma grande zona de escoamento em repouso. Assim, o aumento do comprimento das chicanas em direção ao impelidor, faz com que o fluido não seja afetado pela turbulência em todo o domínio do tanque. Nota-se regiões onde não há turbulência, o que pode causar uma mistura pobre. Nestes casos, a energia cinética de turbulência aumenta, porém, sua distribuição não é homogênea, se mostrando semelhante ao caso sem chicanas.

Para um melhor estudo sobre a eficiência da mistura no interior do tanque, além da energia cinética de turbulência, também é feita uma análise envolvendo a distribuição de um traçador. Assim, com o escoamento já em regime permanente, um traçador é inserido no fluido com a intenção de avaliar características da mistura. Assim, é levado em conta o tempo em que o traçador demora para ser homogeneizado com o restante do fluido, bem como, o desvio padrão deste no domínio do tanque. O traçador é inserido no tanque como mostrado na Fig. 4.5, sendo este afetado pelo escoamento e espalhado por todo o domínio do tanque. A máxima fração de massa do traçador é monitorada no tanque, e a variação entre a anterior e a próxima é calculada. Quando esta variação é menor do que 5% considera-se que o traçador já está suficientemente distribuído no tanque, não sendo mais afetado pelo escoamento com o passar do tempo. A Tabela 5.2 apresenta o tempo em que cada caso levou para atingir uma variação menor do que 5%, isto é, o tempo em que ocorre a homogeneização do sistema.

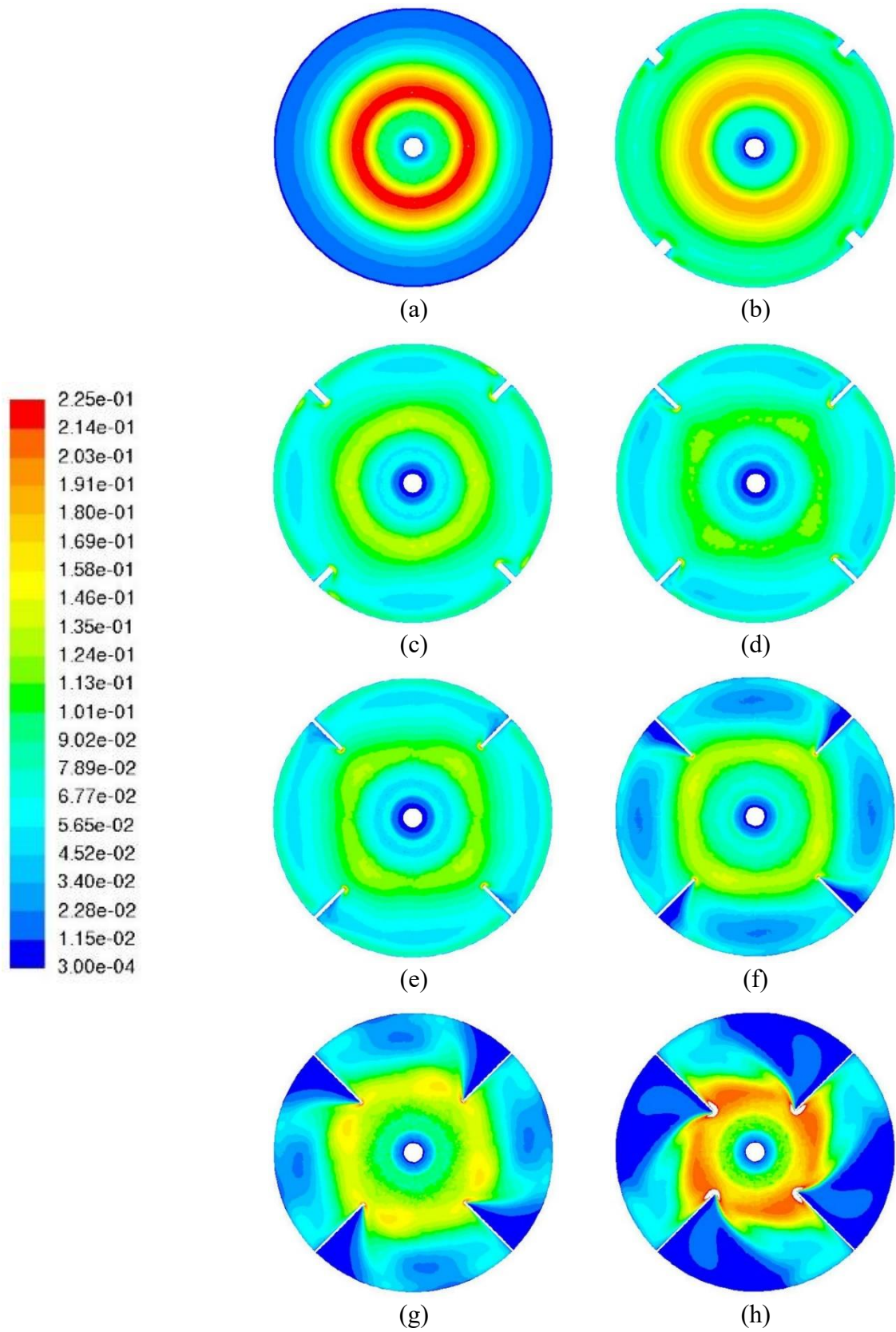


Figura 5.15 - Média temporal da energia cinética de turbulência para o tanque com 4 chicanas. (a) Sem chicanas. (b) $L/B = 1$. (c) $L/B = 0,29$. (d) $L/B = 0,14$. (e) $L/B = 0,08$. (f) $L/B = 0,05$. (g) $L/B = 0,03$. (h) $L/B = 0,02$.

Tabela 5.2 - Valor máximo da variação da fração de massa do traçador em função do tempo no domínio do tanque para o caso com 4 chicanas.

	Tempo (s)	Variação (%)
Sem chicanas	5	4,82
L/B=1	4,5	3,61
L/B=0,29	4,5	1,18
L/B=0,14	4	3,12
L/B=0,08	4,5	3,01
L/B=0,05	6,5	4,02
L/B=0,03	5	3,95
L/B=0,02	4	4,60

Conforme mostrado na Tabela 5.2, o caso que demorou mais tempo para atingir o equilíbrio do sistema foi o $L/B = 0,05$, levando 6,5 s. O equilíbrio mais rápido ocorreu nos casos com $L/B = 0,14$ e $L/B = 0,02$, levando 4 s. Assim, considera-se que o tempo de 7 s é suficiente para avaliar a interação do traçador no escoamento do sistema. Além disso, leva-se em conta que, o menor desvio padrão no sistema representa a melhor mistura, conforme mostrado na Fig. 5.16.

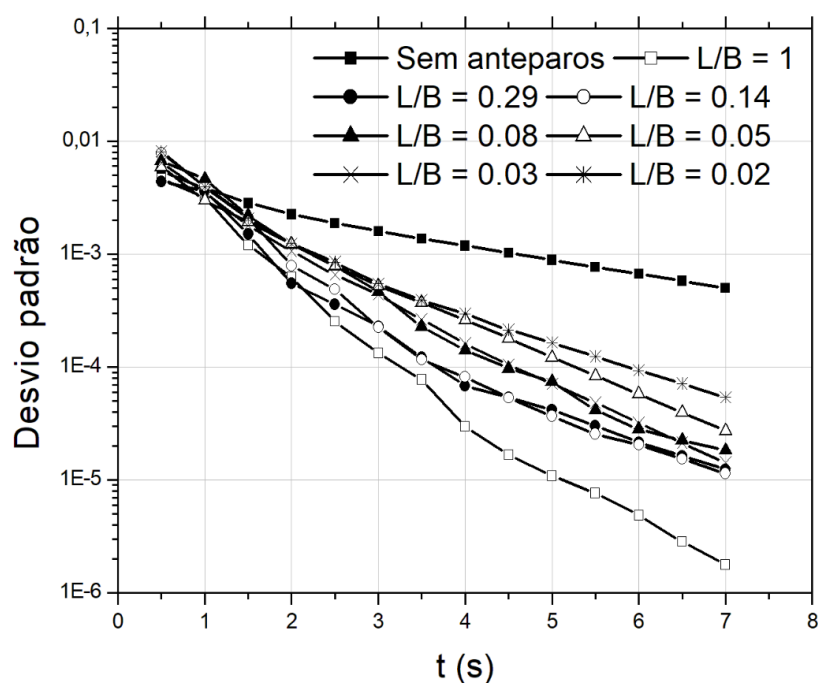


Figura 5.16 – Desvio padrão da fração de massa do traçador em função do tempo para os casos com 4 chicanas.

Observa-se que, inicialmente todos os casos possuem um valor aproximado do desvio padrão, mudando seus valores conforme o sistema vai sendo homogeneizado. Considerando os casos que atingem o equilíbrio mais rapidamente ($L/B = 0,02$ e $L/B = 0,14$), nota-se que aquele com o menor desvio padrão e consequentemente a melhor homogeneização foi o caso com $L/B = 0,14$ (chicana com comprimento menor do que o caso com $L/B = 0,02$). Porém, o caso que apresentou o menor desvio padrão, entre todos os casos, foi a relação $L/B = 1$, que leva apenas 0,5 s a mais que os citados acima para atingir sua homogeneização. Este caso é aquele com o menor comprimento de chicana. O maior desvio padrão é apresentado no caso sem chicanas, e leva 5 s para atingir o equilíbrio. Comparando o caso sem chicanas com o caso em que $L/B = 1$, é possível perceber a grande influência que as chicanas exercem no sistema, alterando o comportamento do escoamento à medida que crescem e se aproximam cada vez mais do centro do tanque. Na Tabela 5.3 é possível observar como as componentes de velocidade interagem e se modificam à medida em que as chicanas são modificadas no interior do tanque.

Tabela 5.3 - Valores temporais médios das componentes de velocidade para o caso com 4 chicanas.

	V_z	V_r	V_θ
Sem chicanas	-0,0379	0,0155	0,7459
$L/B = 1$	0,0412 ^{**}	-0,0208	0,1668 ^{**}
$L/B = 0,29$	0,0210	-0,0225 ^{**}	0,0676
$L/B = 0,14$	0,0279	-0,0219	0,0285
$L/B = 0,08$	0,0053 [*]	-0,0201	0,0073
$L/B = 0,05$	-0,0241	-0,0083	0,0046 [*]
$L/B = 0,03$	-0,0389	-0,0082	-0,0177
$L/B = 0,02$	-0,0087	-0,0014 [*]	-0,0373

(*) menores magnitudes de determinada componente para todas as razões L/B .
(**) maiores magnitudes de determinada componente para todas as razões L/B .

A partir da Tab. 5.3 nota-se que, o caso sem chicanas é predominantemente de escoamento tangencial. Como citado na seção 2.2, um escoamento desse tipo não auxilia na mistura, já que o fluido entra em um movimento circulatório sem grandes alterações de sentido, o que não acarreta em uma agitação efetiva no interior do tanque. Percebe-se ainda, uma grande influência sobre o escoamento quando as chicanas são inseridas no tanque. A componente tangencial tem uma queda

substancial, tornando o escoamento mais axial e radial, demonstrando que o escoamento não é mais predominantemente tangencial. O caso em que apresentou o menor desvio padrão ($L/B = 1$), e consequentemente, a maior homogeneização do sistema (melhor mistura), foi o caso em que duas das componentes de velocidade (axial e tangencial) obtiveram os maiores valores simultaneamente.

Observando a Figura 5.17 e fazendo uma comparação entre o caso sem chicanas, o melhor caso ($L/B = 1$), o pior caso ($L/B = 0,02$) e um caso intermediário ($L/B = 0,03$), é fácil notar que os vetores apresentados para a simulação sem chicanas, reproduzem um escoamento predominantemente tangencial, onde estes apontam para “dentro” do plano Fig. 5.17(a). Na Figura 5.17(b), com a presença das chicanas, ocorre o redirecionamento do escoamento no interior do tanque, apresentando grande semelhança do perfil de velocidades com o caso apresentado pela literatura, Fig. 5.2 (a). Nota-se um escoamento radial e axial, o que implica em melhores homogeneizações da mistura. Os vórtices abaixo e acima do impelidor podem ser observados com clareza.

Por outro lado, é perceptível a diminuição dos vórtices nas regiões acima e abaixo do impelidor para os casos das Figs. 5.17(c)-(d), o que indica que o escoamento pode estar retornando a um perfil mais tangencial.

Em termos de mistura, como mencionado anteriormente, as simulações foram executadas até o tempo físico de 7 s, onde todos os casos já haviam demonstrado homogeneização do sistema. Assim, na Fig. 5.18 é possível observar a distribuição do traçador no volume do tanque em 7 s para o caso sem chicanas. Este, pode ser comparado com o caso que possui 4 chicanas, observando a Fig. 5.19.

Percebe-se, a partir da distribuição do traçador no volume do tanque, que o caso mais homogêneo é a razão $L/B = 1$, como já apresentado anteriormente em outros resultados. Com isso, a Fig. 5.20 apresenta a evolução do traçador no volume do tanque para o caso que mais se aproxima de uma mistura eficiente, a razão $L/B = 1$. A legenda do gradiente de cores mostra, com o passar do tempo, a homogeneização do sistema. É possível notar que, a partir da Fig. 5.20(e), a distribuição não muda mais, isto é, o sistema já está homogeneizado. Este resultado pode ser comparado com a Tabela 5.2, que mostra o tempo de homogeneização para a razão $L/B = 1$ é de 4,5 s.

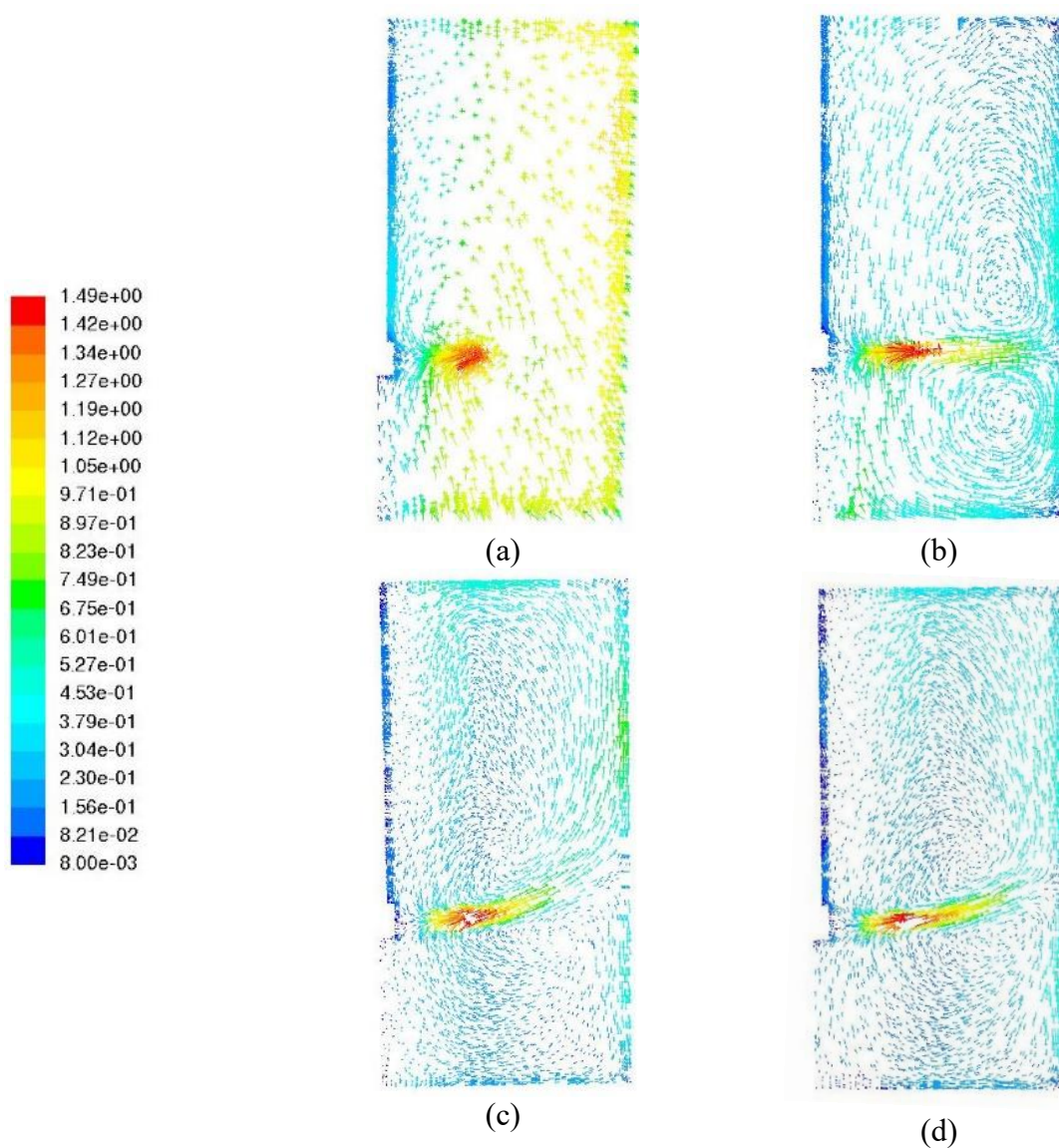


Figura 5.17 – Comparação do campo vetorial da magnitude das velocidades em um plano vertical. (a) Tanque sem chicanas. (b) Tanque com 4 chicanas e $L/B=1$. (c) Tanque com 4 chicanas e $L/B=0,02$. (d) Tanque com 4 chicanas e $L/B=0,03$.

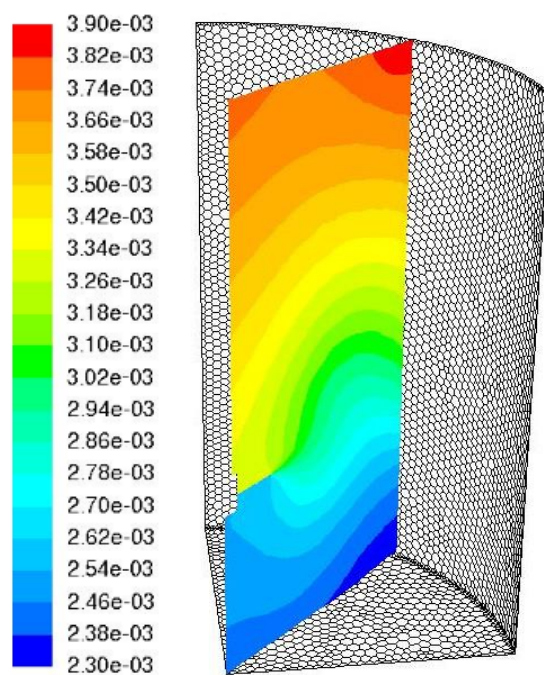


Figura 5.18 - Distribuição do traçador no volume do tanque sem chicanas. Visão de um plano transversal.

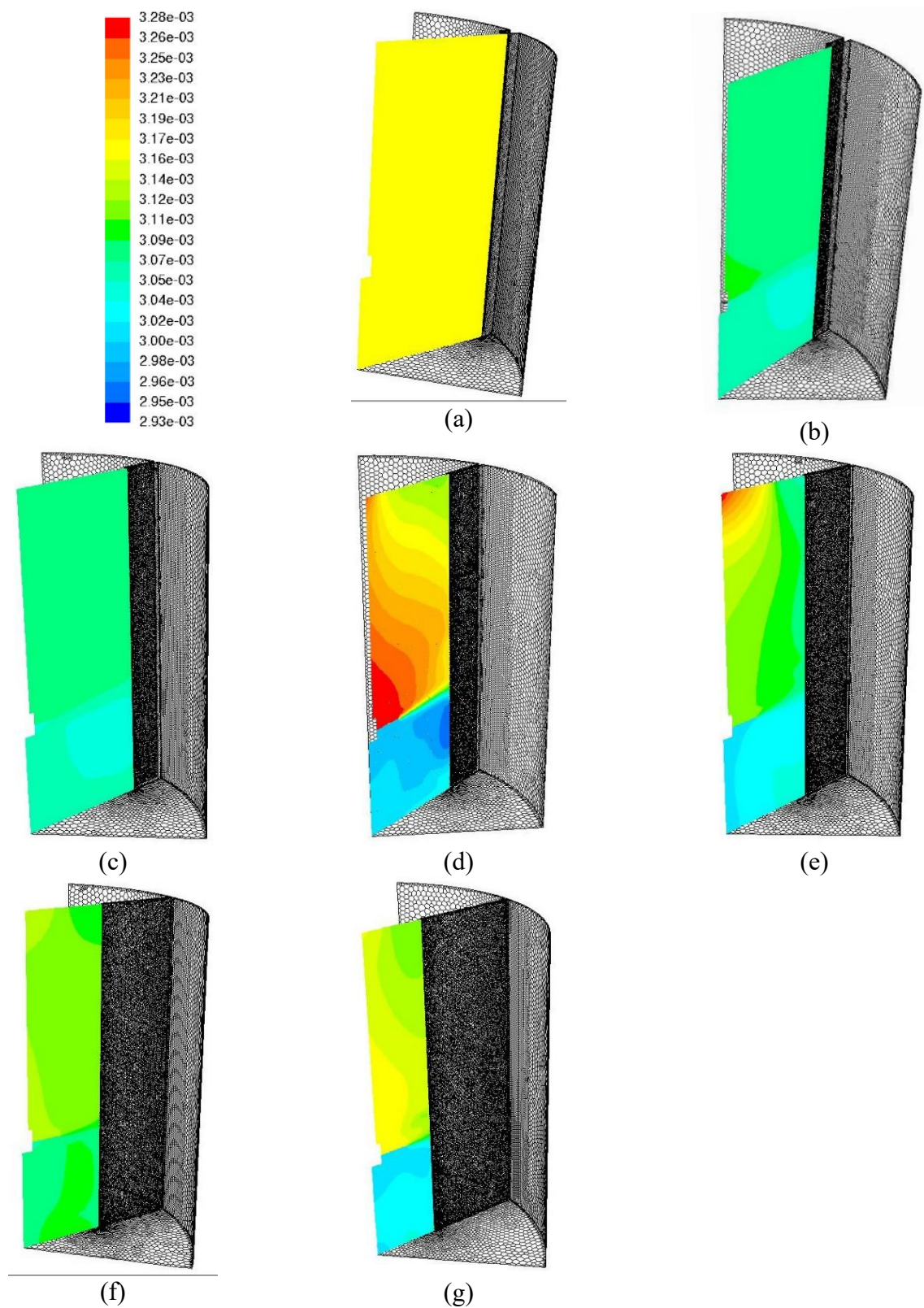


Figura 5.19 - Distribuição do traçador no volume do tanque de 4 chicanas no tempo de 7 s. Visão de um plano transversal na região da chicana. (a) $L/B = 1$. (b) $L/B = 0,29$. (c) $L/B = 0,14$. (d) $L/B = 0,08$. (e) $L/B = 0,05$. (f) $L/B = 0,03$. (g) $L/B = 0,02$.

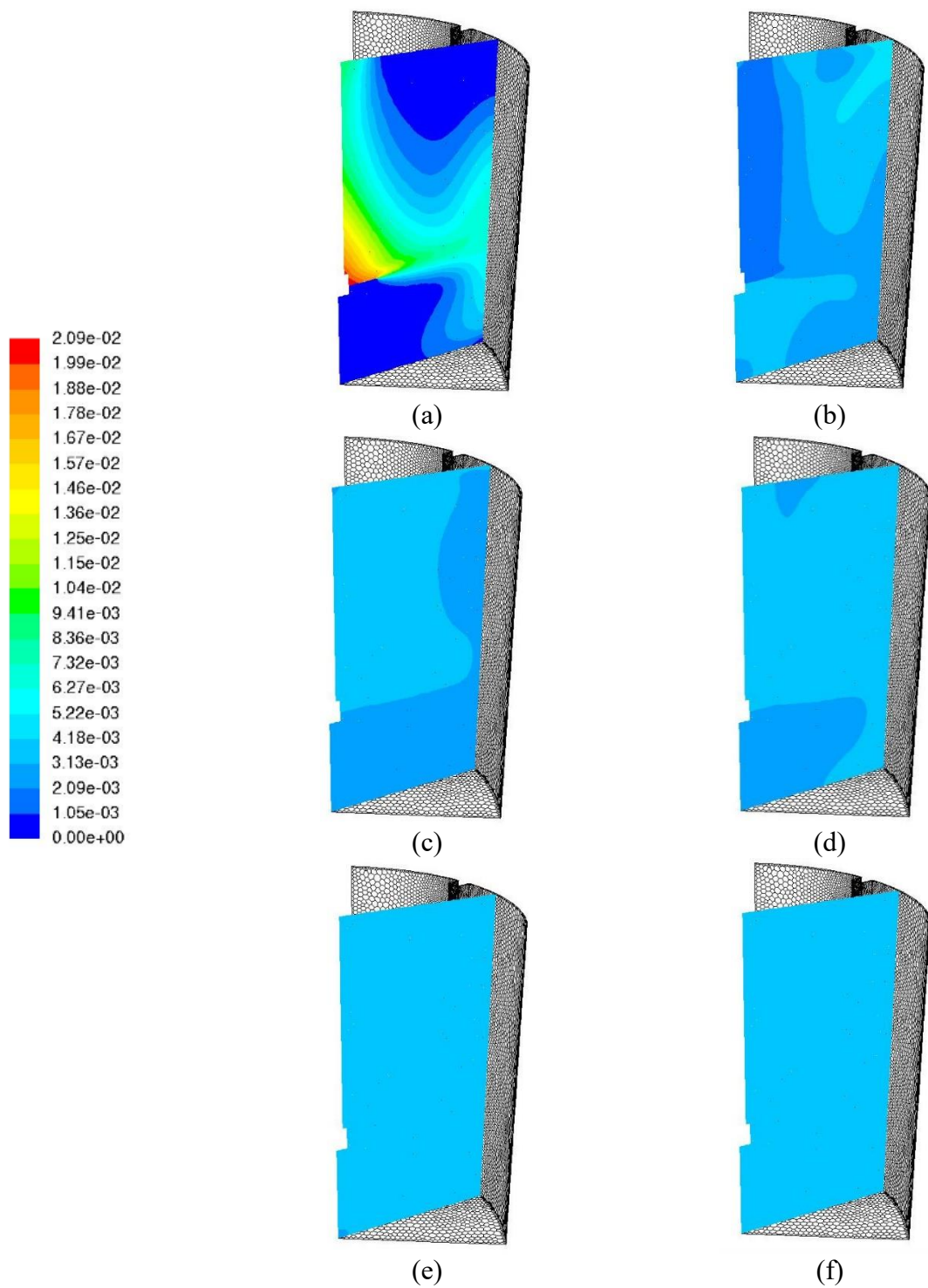


Figura 5.20 - Evolução do traçador com o tempo em um tanque com 4 chicanas e $L/B = 1$. Visão de um plano de corte ao lado da chicana. (a) 1 s. (b) 2 s. (c) 3 s. (d) 4 s. (e) 5 s. (f) 6 s.

5.3.2. Tanque com 6 chicanas

A Figura 5.21, apresenta a média temporal da energia cinética de turbulência para o tanque com 6 chicanas em um plano na região do impelidor. Nota-se que a energia cinética de turbulência é maior para a razão $L/B = 1$, além de ser bem distribuída no tanque. Isso leva a acreditar que a melhor mistura para este caso também seja representada por esta razão, como foi o caso de 4 chicanas.

A partir da razão $L/B = 0,145$, a magnitude da turbulência não apresenta grandes mudanças, o que se nota é a diferença da distribuição no domínio do tanque para cada razão. Do mesmo modo como ocorreu no caso de 4 chicanas, quanto maior o comprimento das chicanas, pior é a distribuição da energia cinética de turbulência, levando a uma pior mistura.

Aqui, um traçador também é inserido no fluido após o escoamento entrar em regime permanente, com a intenção de avaliar as características da mistura. O tempo em que o traçador demora para ser homogeneizado com o restante do fluido, e o menor erro relativo da fração de massa para cada dimensão de chicana, é apresentado na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Valor máximo da variação da fração de massa do traçador em função do tempo no domínio do tanque para o caso com 6 chicanas.

	Tempo (s)	Variação (%)
Sem chicanas	5	4,82
$L/B=1$	4,5	0,62
$L/B=0,375$	4,5	0,73
$L/B=0,145$	4	2,12
$L/B=0,075$	5,5	4,6
$L/B=0,045$	6	4,35
$L/B=0,035$	4	1,54
$L/B=0,015$	4,5	1,68

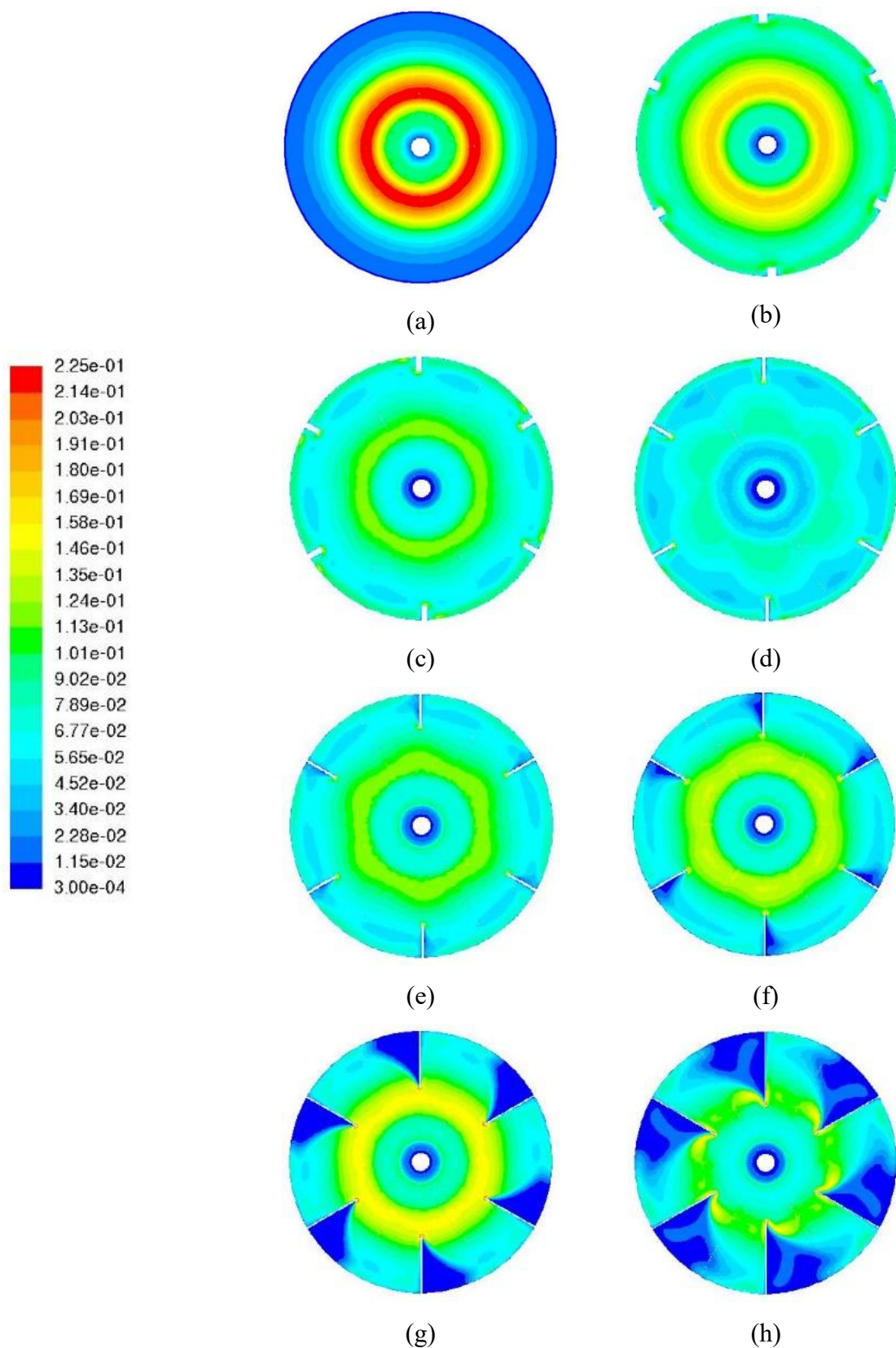


Figura 5.21 - Média temporal da energia cinética de turbulência para o tanque com 6 chicanas. (a) Sem chicanas. (b) $L/B = 1$. (c) $L/B = 0,375$. (d) $L/B = 0,145$. (e) $L/B = 0,075$. (f) $L/B = 0,045$. (g) $L/B = 0,035$. (h) $L/B = 0,015$.

Para cada dimensão de chicanas, o desvio padrão da fração de massa com o tempo é calculado no domínio do tanque e apresentado na Fig. 5.22.

Nota-se que, semelhante ao caso com 4 chicanas, a razão que se mostrou mais eficiente em termos de mistura também foi a razão $L/B = 1$, demonstrando o menor desvio padrão da fração de massa. Foi esta razão que também apresentou a maior magnitude da turbulência, juntamente com uma boa distribuição da mesma no domínio do tanque, além de levar apenas 0,5 s a mais para a homogeneização do que as dimensões que homogeneizaram mais rápido ($L/B = 0,145$ e $L/B = 0,035$). Sendo que a razão $L/B = 0,035$ foi a que apresentou o maior desvio padrão da fração de massa do traçador, indicando a pior mistura. A razão $L/B = 0,145$ mostra-se como um caso intermediário em termos do desvio padrão e da mistura.

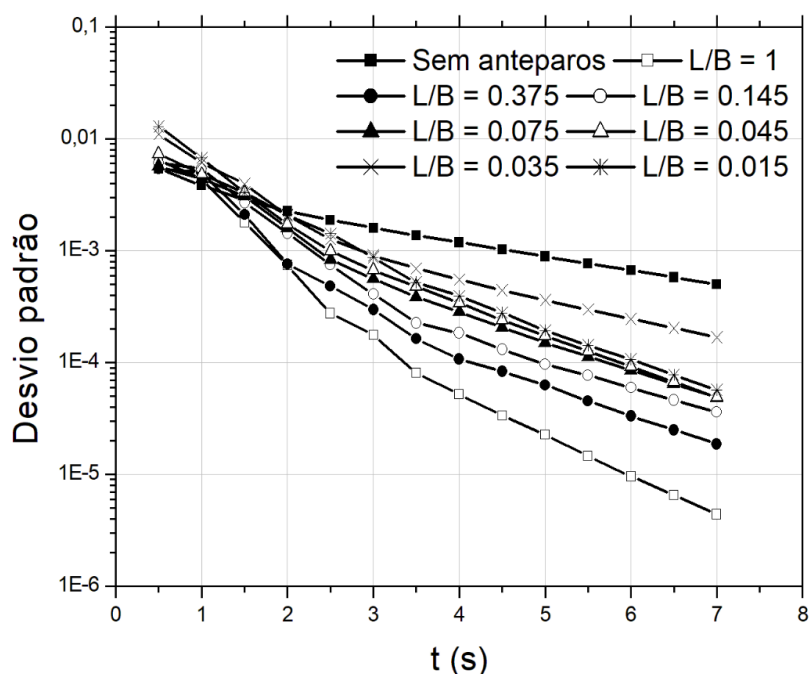


Figura 5.22 – Desvio padrão da fração de massa do traçador em função do tempo para os casos com 6 chicanas.

A Tabela 5.5 mostra como as componentes de velocidade interagem e se modificam à medida em que as dimensões das chicanas são afetadas. Nota-se um comportamento semelhante ao caso com 4 chicanas, onde a presença das chicanas influencia fortemente o escoamento, revertendo um padrão predominantemente tangencial.

Percebe-se ainda, que duas componentes de velocidade (axial e tangencial) se mostram com a maior magnitude simultaneamente na razão $L/B = 1$. Esta razão também foi a que demonstrou o menor desvio padrão no sistema (maior eficiência de mistura).

A Figura 5.23 apresenta o campo vetorial da magnitude das velocidades para os casos sem chicanas, o melhor caso ($L/B = 1$), o pior caso ($L/B = 0,035$) e um caso intermediário ($L/B = 0,145$).

Semelhante ao tanque de 4 chicanas, no tanque de 6 chicanas os vórtices abaixo e acima do impelidor são mais perceptíveis na razão $L/B = 1$. No entanto, a presença de vórtices acima e abaixo do impelidor ainda pode ser notada nas situações em que $L/B = 0,035$ e $L/B = 0,145$. Isso indica que, mesmo com a modificação das chicanas para estas duas situações o escoamento ainda possui um comportamento radial. Percebe-se nas Tabelas 5.3 e 5.5 que a velocidade radial para o pior caso e para o caso intermediário é maior do que para estes mesmos casos no tanque com 4 chicanas. Provavelmente, a presença de mais duas chicanas auxiliou no aumento deste campo de velocidade.

Tabela 5.5 - Valores temporais médios das componentes de velocidade para o caso com 4 chicanas.

	V_z	V_r	V_θ
Sem chicanas	-0,0379	0,0155	0,7459
$L/B = 1$	0,0483 ^{**}	-0,0174	0,1493 ^{**}
$L/B = 0,375$	0,0318	-0,0193	0,0721
$L/B = 0,145$	0,0208	-0,0260 ^{**}	0,0231
$L/B = 0,075$	-0,0103	-0,0099	-0,0044 [*]
$L/B = 0,045$	-0,0005 [*]	-0,0044 [*]	-0,0174
$L/B = 0,035$	0,0060	-0,0057	-0,0322
$L/B = 0,015$	0,0082	-0,0116	-0,0317

(*) menores magnitudes de determinada componente para todas as razões L/B .

(**) maiores magnitudes de determinada componente para todas as razões L/B .

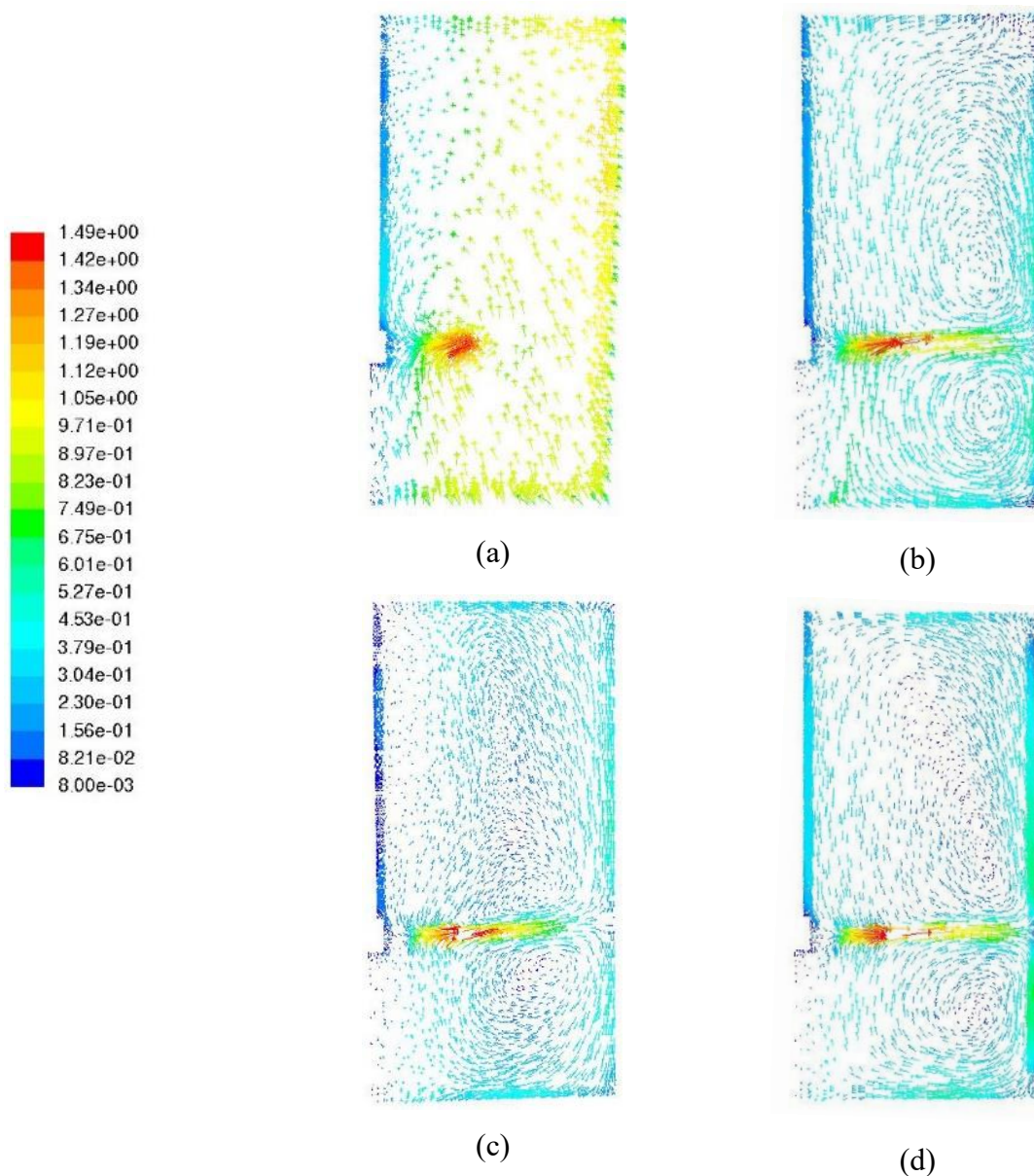


Figura 5.23 – Comparação do campo vetorial da magnitude das velocidades em um plano vertical.

(a) Tanque sem chicanas. (b) Tanque com 6 chicanas e $L/B = 1$. (c) Tanque com 6 chicanas e $L/B = 0,035$. (d) Tanque com 6 chicanas e $L/B = 0,145$.

A distribuição do traçador no volume do tanque em 7 s para todos os casos (relação L / B), é apresentada na Fig. 5.24 para o tanque com 6 chicanas.

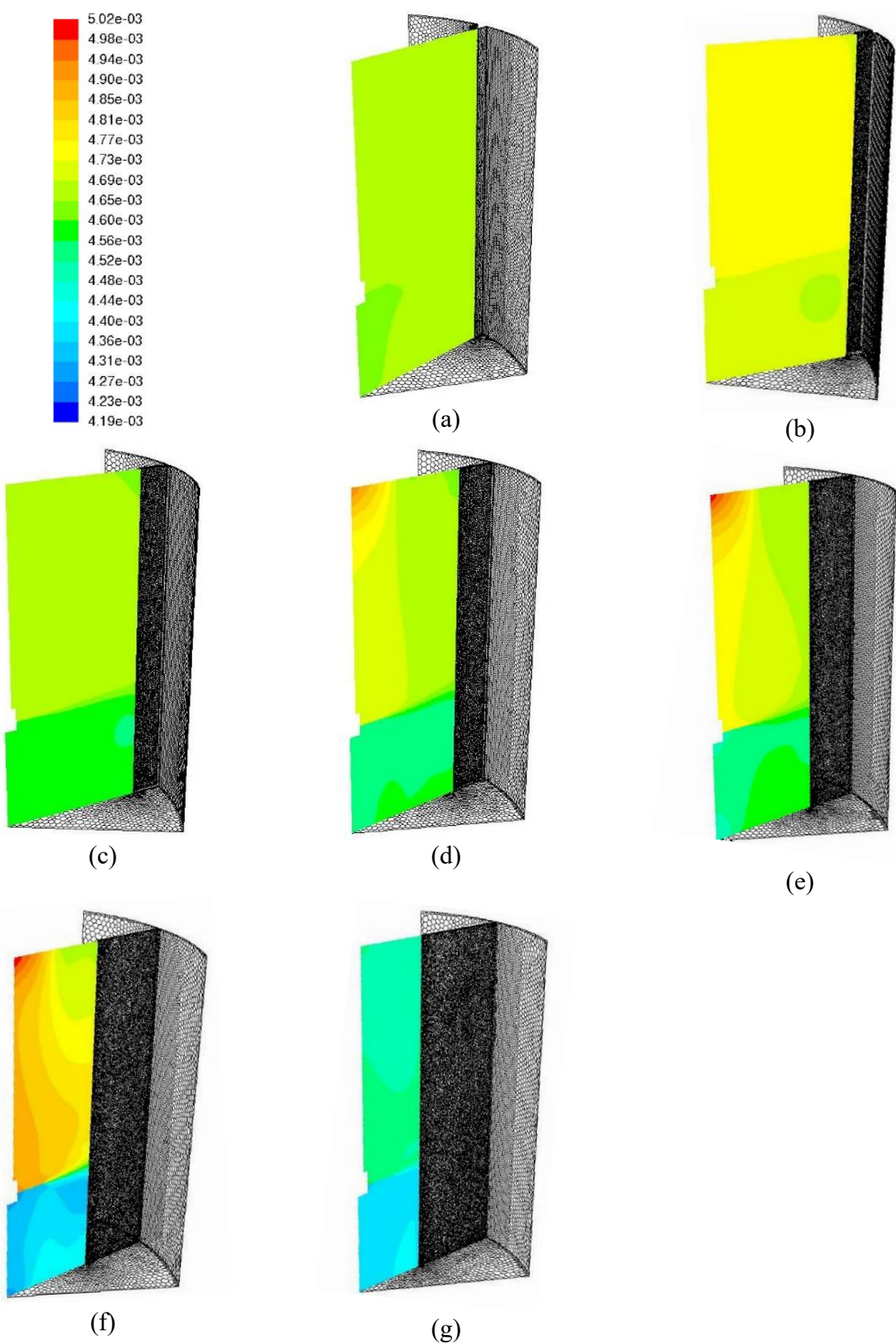


Figura 5.24 - Distribuição do traçador no volume do tanque de 6 chicanas no tempo de 7 s. Visão de um plano transversal na região da chicana. (a) $L/B = 1$. (b) $L/B = 0,375$. (c) $L/B = 0,145$. (d) $L/B = 0,075$. (e) $L/B = 0,045$. (f) $L/B = 0,035$. (g) $L/B = 0,015$.

A partir da Figura 5.24, nota-se que a distribuição mais homogênea do traçador encontra-se na razão $L/B = 1$. Esta mesma razão apresentou o menor desvio padrão do traçador no domínio do tanque. Assim, nas próximas imagens, Fig. 5.25, é possível observar a evolução da mistura com o tempo no interior do tanque de 6 chicanas e razão $L/B = 1$. Nota-se que, a distribuição da fração de massa começa a demonstrar homogeneização a partir de 4 s. Este resultado pode ser comparado com a Tabela 5.4, que apresenta o tempo de homogeneização para este caso igual a 4,5 s.

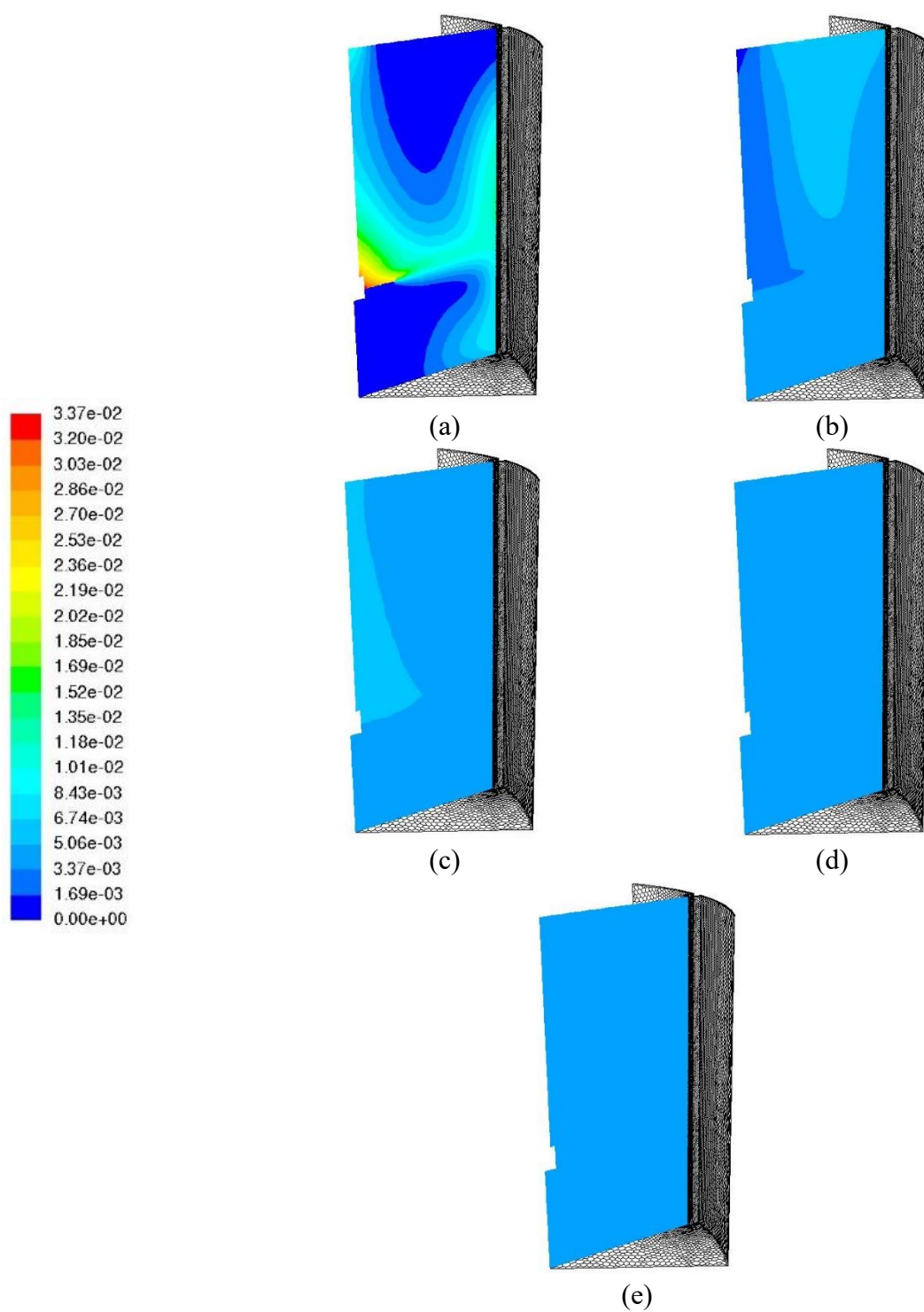


Figura 5.25 - Evolução do traçador com o tempo em um tanque com 6 chicanas e $L/B = 1$.
Visão de um plano de corte ao lado da chicana. (a) 1 s. (b) 2 s. (c) 3 s. (d) 4 s. (e) 5 s.

5.3.3. Tanque com 8 chicanas

A Figura 5.26 apresenta a média temporal da energia cinética de turbulência para o tanque com 8 chicanas em um plano na região do impelidor. Este tanque apresenta uma maior intensidade da energia cinética de turbulência para a razão $L/B = 1$. A partir desta razão, até a razão $L/B = 0,01$ não existe uma variação significativa da intensidade de turbulência. No entanto, comparando a razão $L/B = 0,01$ com as demais razões, percebe-se que, apesar da energia cinética de turbulência não apresentar variações significativas entre uma razão e outra, o aumento do comprimento das chicanas conduz a uma pior distribuição desta energia no volume do tanque, apresentando o pior cenário na razão $L/B = 0,01$.

A Tabela 5.6 mostra o tempo de homogeneização de cada razão L/B para o tanque com 8 chicanas. A variação apresentada na última coluna da tabela, faz referência à diferença entre o valor máximo da fração de massa no volume do tanque no instante anterior e no instante posterior para cada uma das razões L/B . Com isso, percebe-se que a razão $L/B = 1$ e $L/B = 0,1$ foram as que levaram menos tempo para homogeneizar a mistura. Por outro lado, a razão $L/B = 0,05$ foi a que mais demorou.

Tabela 5.6 - Valor máximo da variação fração de massa do traçador em função do tempo no domínio do tanque para o caso com 8 chicanas.

	Tempo (s)	Variação (%)
Sem chicanas	5	4,82
$L/B=1$	4	4,24
$L/B=0,25$	4,5	0,6
$L/B=0,1$	4	4,37
$L/B=0,05$	5,5	1,35
$L/B=0,03$	5	2,04
$L/B=0,02$	4,5	3,51
$L/B=0,01$	4,5	3,92

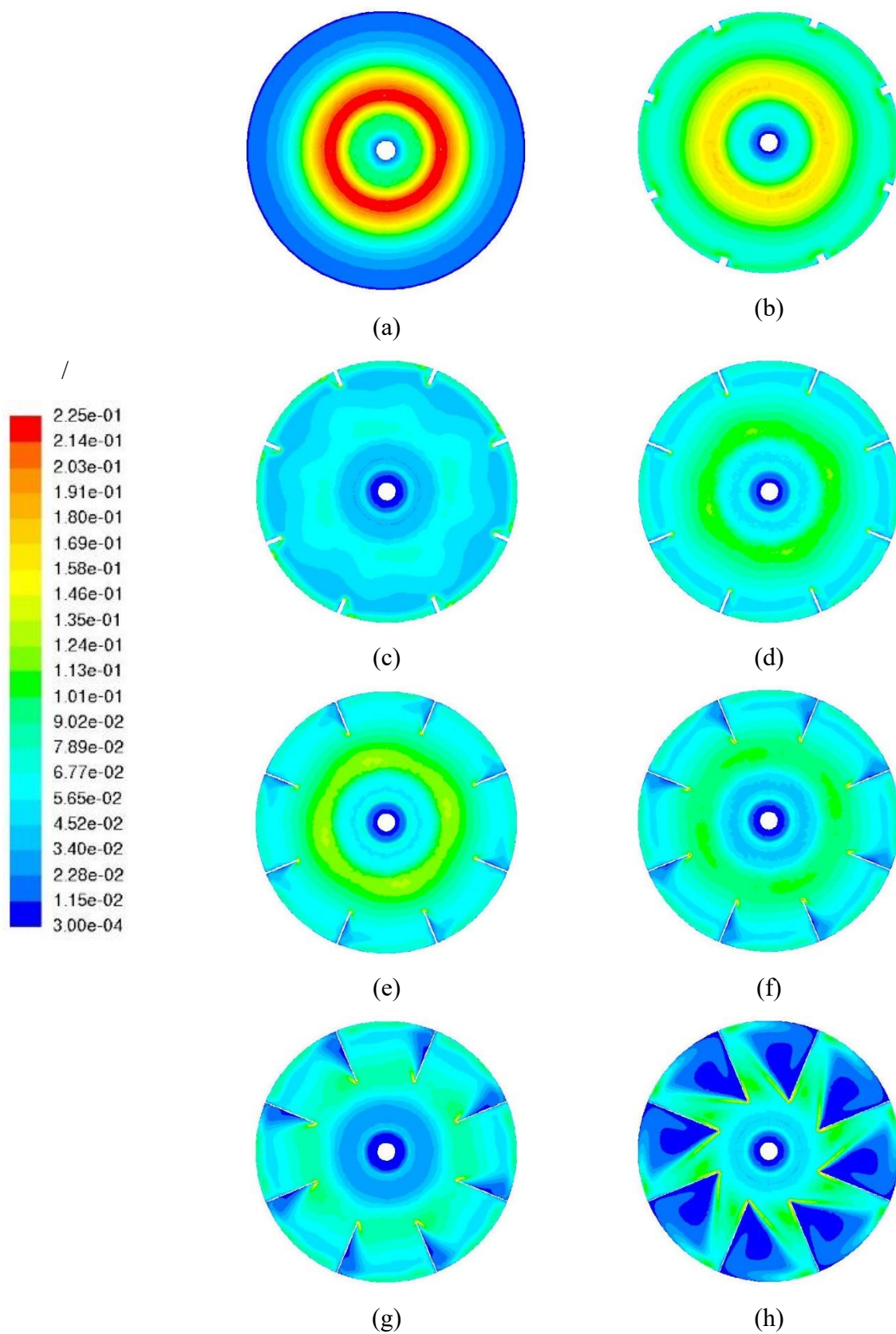


Figura 5.26 - Média temporal da energia cinética de turbulência para o tanque com 8 chicanas. (a) Sem chicanas. (b) $L/B = 1$. (c) $L/B = 0,25$. (d) $L/B = 0,1$. (e) $L/B = 0,05$. (f) $L/B = 0,03$. (g) $L/B = 0,02$. (h) $L/B = 0,01$.

A Figura 5.27 apresenta o desvio padrão da fração de massa no volume do tanque. É possível perceber que, a razão $L/B = 1$ além de ter homogeneizado com mais rapidez, ainda é a que apresenta o menor desvio padrão da fração de massa, indicando uma melhor mistura. O caso com 8 chicanas foi o único que demonstrou a homogeneização mais rápida e o menor desvio padrão simultaneamente para o caso $L/B = 1$. Sendo assim, para o tanque de 8 chicanas, a razão que apresenta a melhor performance no sistema é também a razão $L/B = 1$, como também ocorreu para os tanques de 4 e 6 chicanas. Além disso, nota-se uma discrepância entre a melhor e a pior mistura, ao passo que, os casos intermediários apresentam pouca variação no desvio padrão do traçador.

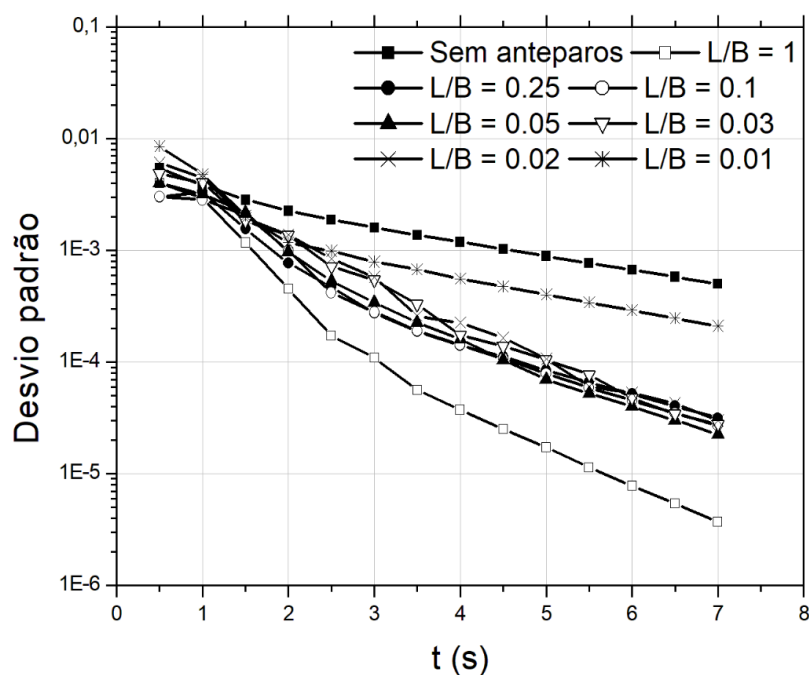


Figura 5.27 – Desvio padrão da fração de massa do traçador em função do tempo para os casos com 8 chicanas.

A Tabela 5.7 mostra os valores das componentes de velocidade axial, radial e tangencial. Destaca-se os maiores valores (em vermelho) e os menores valores (em verde) para cada componente. Da mesma maneira como aconteceu com os tanques de 4 e 6 chicanas, no tanque com 8 chicanas a razão que demonstrou a mistura mais eficiente, também foi a razão que apresentou duas componentes (axial e tangencial) com maiores valores de velocidade, simultaneamente.

Tabela 5.7 - Valores temporais médios das componentes de velocidade para o caso com 8 chicanas.

	V_z	V_r	V_θ
Sem chicanas			
L/B = 1	0,0490**	-0,0150	0,1347**
L/B = 0,25	0,0287	-0,0194**	0,0357
L/B = 0,1	0,0123	-0,0123	0,0092
L/B = 0,05	-0,0036*	-0,0074*	-0,0103
L/B = 0,03	-0,0064	-0,0114	-0,0126
L/B = 0,02	-0,0162	-0,0168	-0,0059*
L/B = 0,01	0,0077	-0,0133	0,0222

(*) menores magnitudes de determinada componente para todas as razões L/B.

(**) maiores magnitudes de determinada componente para todas as razões L/B.

A Figura 5.28, apresenta o campo vetorial das magnitudes das velocidades. Nota-se que o comportamento do escoamento para a razão $L/B = 1$, Fig. 5.28(b), apresenta de uma forma mais evidente, a formação de vórtices acima e abaixo da linha do impelidor, o que pode ser um indicativo de que esse caso aumente a mistura na direção axial do tanque.

Com relação à distribuição do traçador no volume do tanque de 8 chicanas, nota-se, a partir da Fig. 5.29, que a razão que obteve a melhor homogeneização do traçador foi a razão $L/B = 1$. Assim, é apresentada a distribuição do traçador no volume do tanque para a razão $L/B = 1$ durante os 7 s de homogeneização Fig. 5.30.

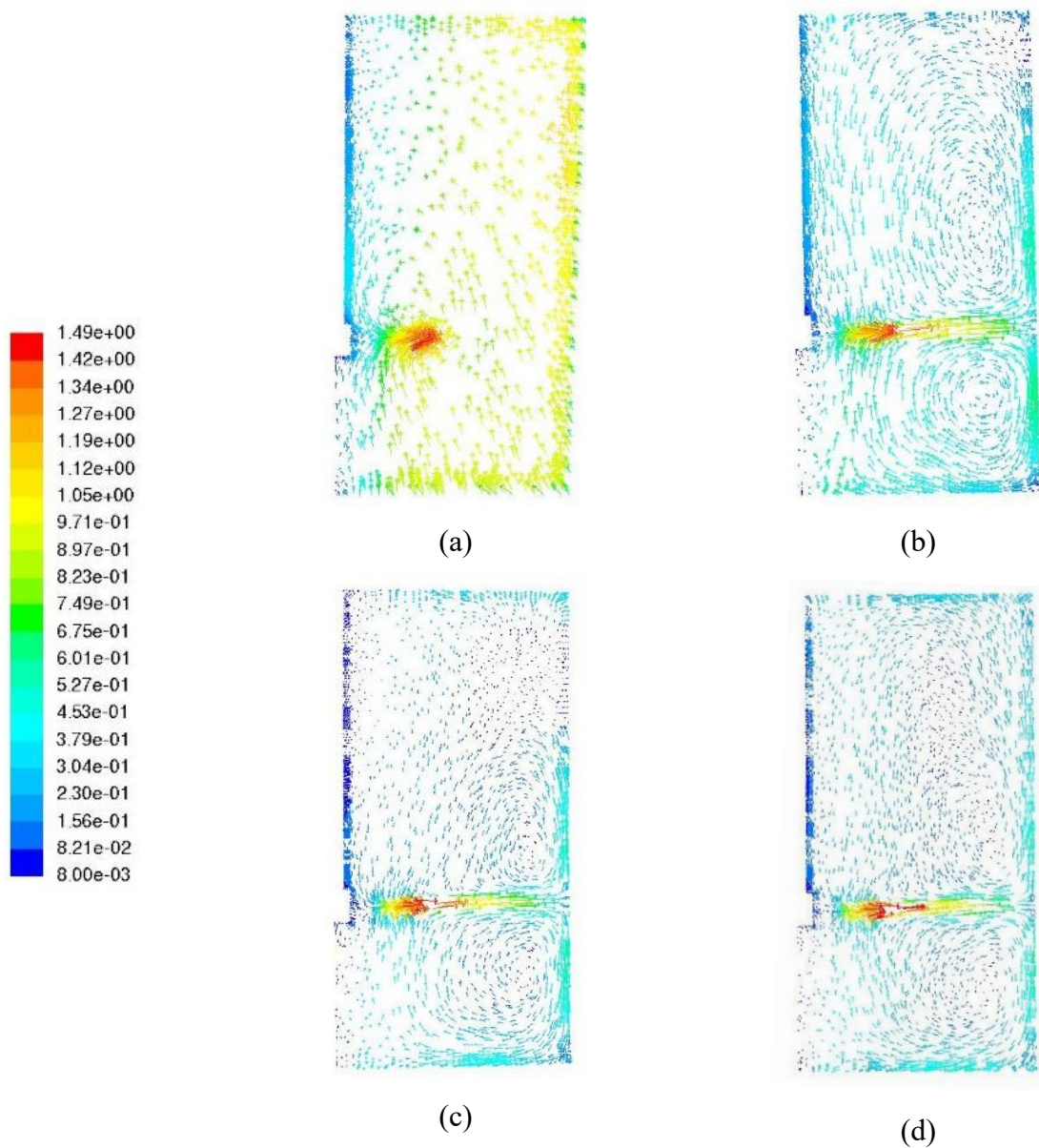


Figura 5.28 – Comparação do campo vetorial da magnitude das velocidades em um plano vertical para um tanque sem chicanas e para um tanque com 8 chicanas. (a) Tanque sem chicanas. (b) Tanque com 8 chicanas e $L/B = 1$. (c) Tanque com 8 chicanas e $L/B = 0,01$ (d) Tanque com 8 chicanas e $L/B = 0,03$.

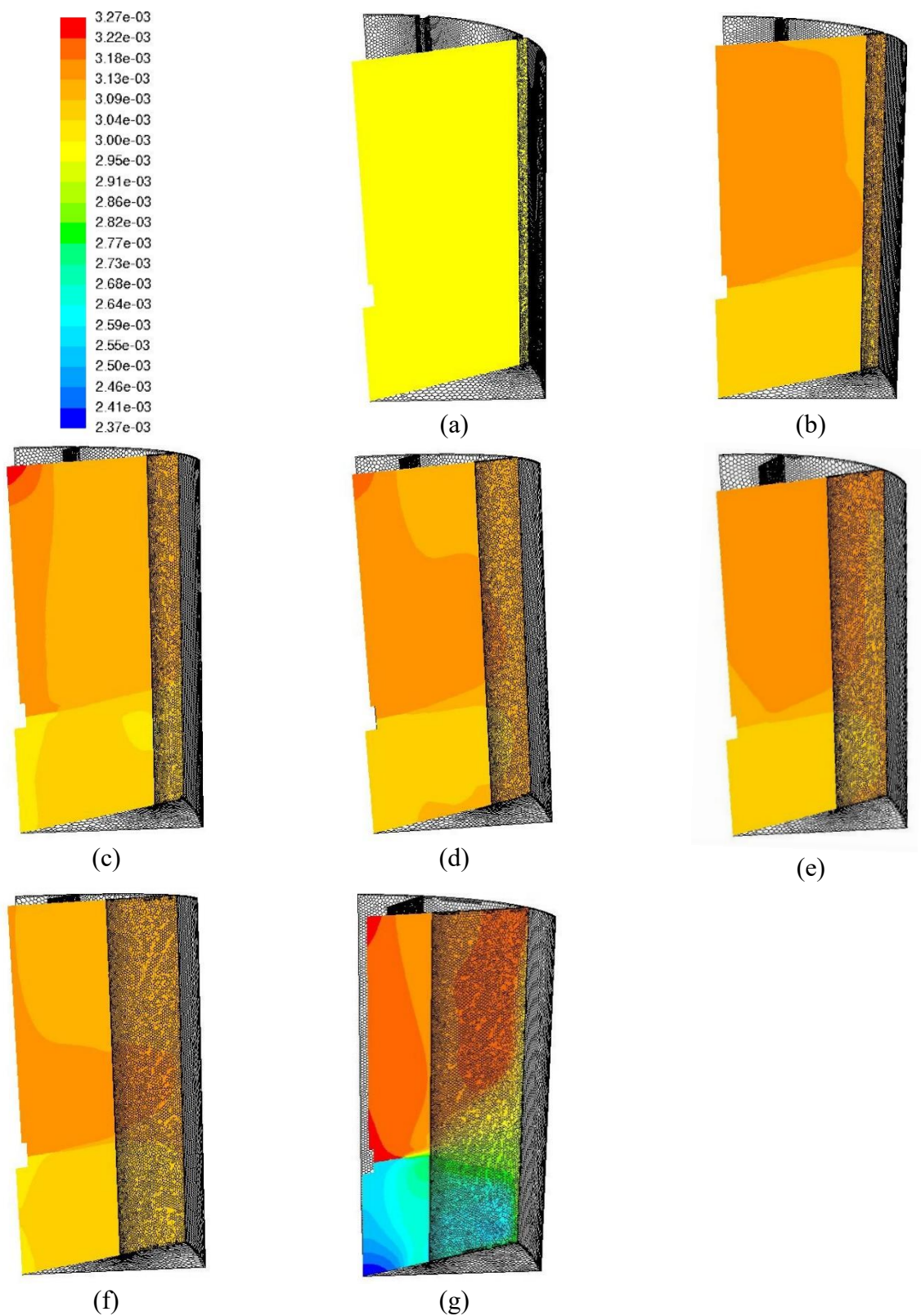


Figura 5.29 - Distribuição do traçador no volume do tanque de 8 chicanas no tempo de 7 s. Visão de um plano transversal na região da chicana. (a) $L/B = 1$. (b) $L/B = 0,25$. (c) $L/B = 0,1$. (d) $L/B = 0,05$. (e) $L/B = 0,03$. (f) $L/B = 0,02$. (g) $L/B = 0,01$.

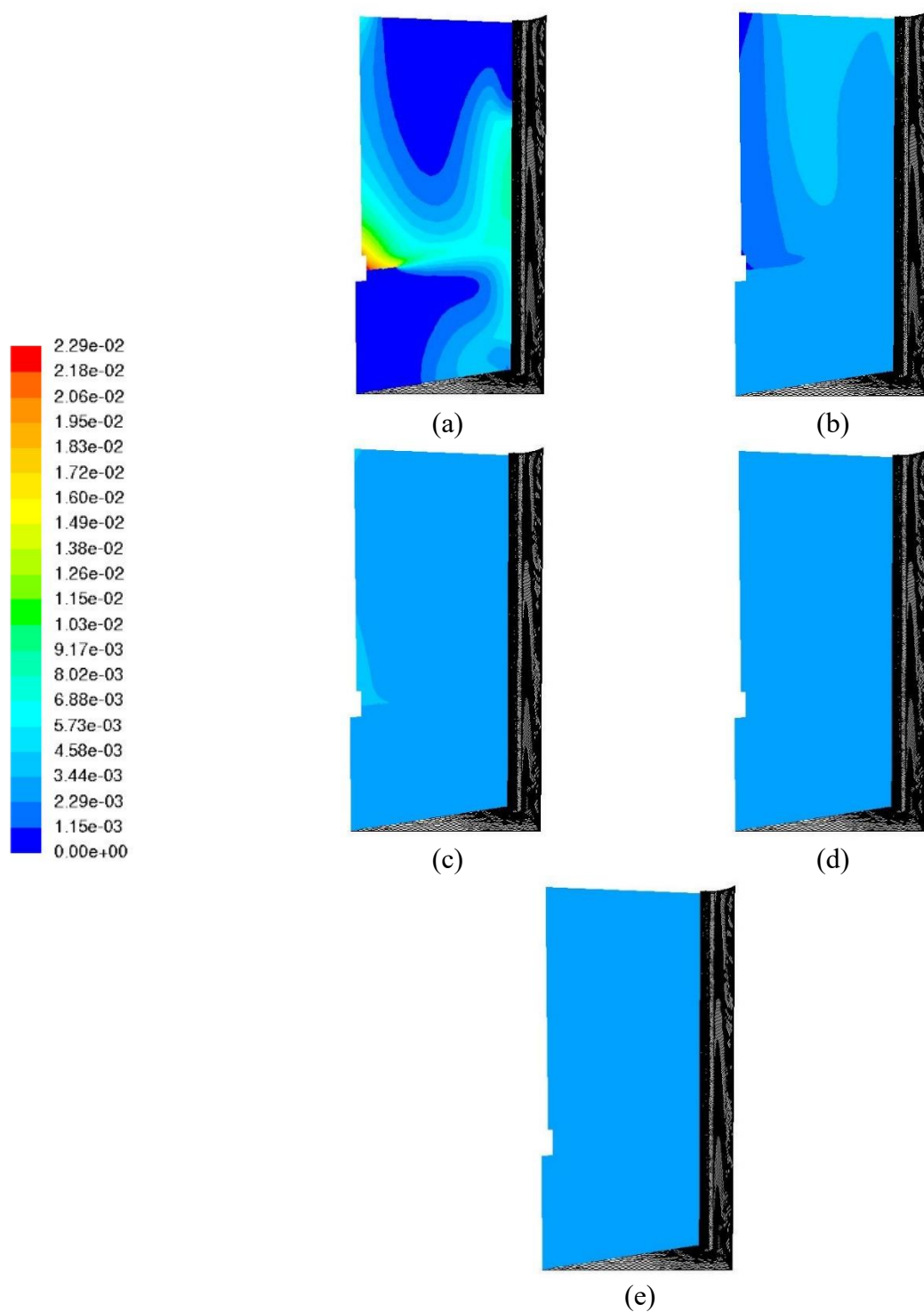


Figura 5.30 - Evolução do traçador com o tempo em um tanque com 8 chicanas e $L/B = 1$. Visão de um plano de corte ao lado da chicana. (a) 1 s. (b) 2 s. (c) 3 s. (d) 4 s. (e) 5 s.

Os campos de fração de massa e da energia cinética da turbulência dão indicativos de que o melhor desempenho é obtido quando esses campos são distribuídos de forma mais homogênea ao longo do domínio do tanque misturador. Esse comportamento está relacionado, e de acordo, com o

princípio Construtal da “Ótima Distribuição das Imperfeições”. Com isso, conclui-se que, para todos os casos (tanques com 4, 6 e 8 chicanas) a configuração que se mostrou mais efetiva para a mistura, foi a que apresenta a dimensão das chicanas seguindo a razão $L/B = 1$.

A Figura 5.31 mostra a tendência do efeito de Na sobre o desvio padrão da fração de massa para a razão $L/B = 1$ no tempo de 7 s.

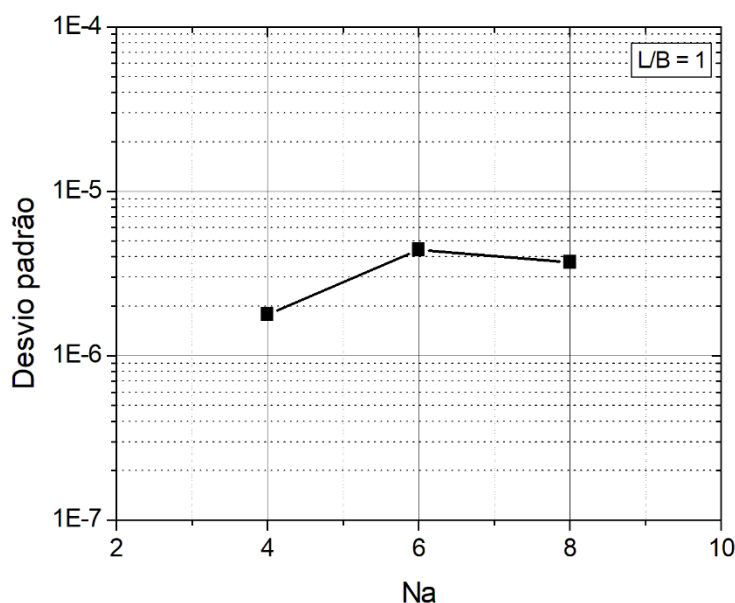


Figura 5.31 - Efeito de Na sobre o desvio padrão da fração de massa para a razão $L/B = 1$ no tempo de 7 s.

Considerando que a diferença no tempo de homogeneização para os tanques com 4, 6 e 8 chicanas é muito pequena (em torno de 0,5 s), a partir da Fig. 5.31, pode-se dizer que o tanque com melhor performance de mistura é o tanque com 4 chicanas, pois este apresenta o menor desvio padrão da fração de massa.

No entanto, outro ponto bastante importante nas pesquisas envolvendo tanques misturadores, é o estudo do número de potência, N_p . Assim, na próxima seção é apresentada uma breve análise sobre o comportamento do N_p para cada razão L/B do tanque de 4, 6 e 8 chicanas.

5.3.4. Número de potência N_p

Seguindo a Eq. 2.4, o número de potência é calculado no tanque utilizado para a validação do modelo numérico, Fig. 4.6, o valor calculado e os valores de referência encontrados na literatura, são

apresentados na Tab. 5.8.

Tabela 5.8 – Valor do Número de Potência: Comparação com a literatura.

Métodos	Np	Erro relativo%
		$Erro = \left(\frac{Np_{literatura} - Np_{autor}}{Np_{literatura}} \right) \times 100$
Experimental (RUSHTON, <i>et. al.</i> , 1950, <i>apud</i> HUANG; LI, 2013).	6,07	36,07
Modelo de malha móvel (MURTHY E JOSHI, 2008, <i>apud</i> HUANG; LI, 2013).	4,9	20,81
Modelo de termo fonte (HUANG; LI, 2013).	5,72	32,16
Modelo de termo fonte	3,88	-----

É possível notar que, o erro relativo entre o modelo de termo fonte do presente trabalho com o modelo de malha móvel e os dados experimentais, demonstram alguma diferença. Isto pode ser explicado pela perda de informação do escoamento turbulento na região do impelidor, pois o modelo impõe uma quantidade de movimento no escoamento, porém não conta com as fronteiras físicas do impelidor, fazendo com que toda a informação contida na rotação das pás seja subestimada.

Com relação à diferença entre o modelo de termo fonte do presente trabalho, e o modelo de termo fonte de Huang; Li, (2013), algumas informações podem estar sendo perdidas por conta do modelo não impor nenhuma fonte de potência, mas apenas fonte de quantidade de movimento.

No entanto, mesmo considerando algumas perdas de informações com relação ao Np, é feita uma análise sobre a influência deste adimensional no escoamento em um tanque misturador. Assim, para cada razão L/B nos tanques com 4, 6 e 8 chicanas, o Np é calculado e apresentado na Fig. 5.32 e no Apêndice 2.

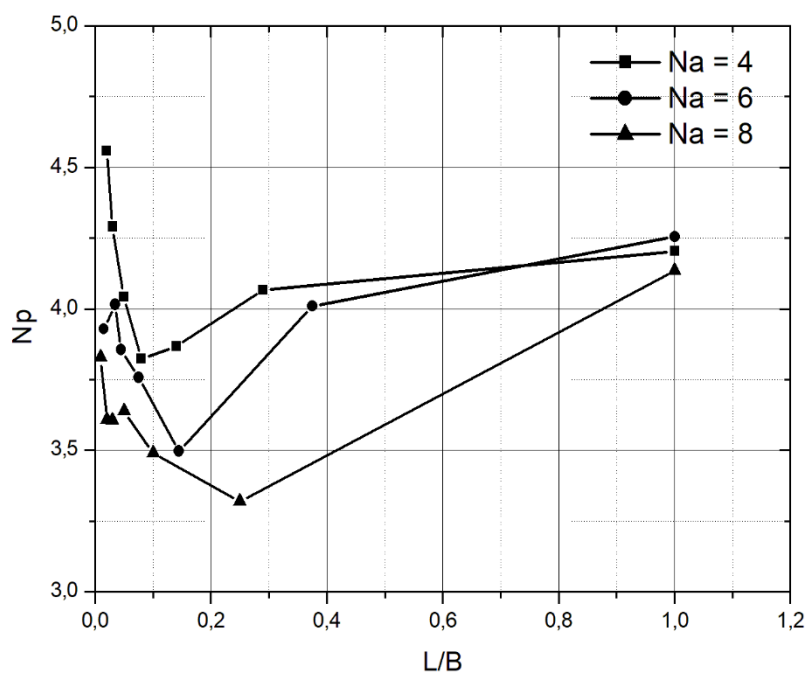


Figura 5.32 – Gráfico do número de potência versus razão L/B .

É possível notar que, para os três tanques o N_p inicia em um valor mais alto, chega até um valor mínimo, e então volta a aumentar, convergindo para um valor próximo a 4 quando $L/B = 1$. Considerando esta mesma razão, o tanque com 8 chicanas foi o que apresentou o menor valor do N_p (4,13), ao passo que, o maior valor do N_p (4,25) foi apresentado pelo tanque com 6 chicanas, deixando o tanque de 4 chicanas com um valor intermediário do N_p (4,20).

Essa análise do N_p pode ser um outro indicador de performance para o problema, onde o objetivo é minimizar o N_p . Assim, a Fig. 5.33 mostra o efeito de N_a sobre o N_p mínimo e a correspondente geometria ótima para cada caso.

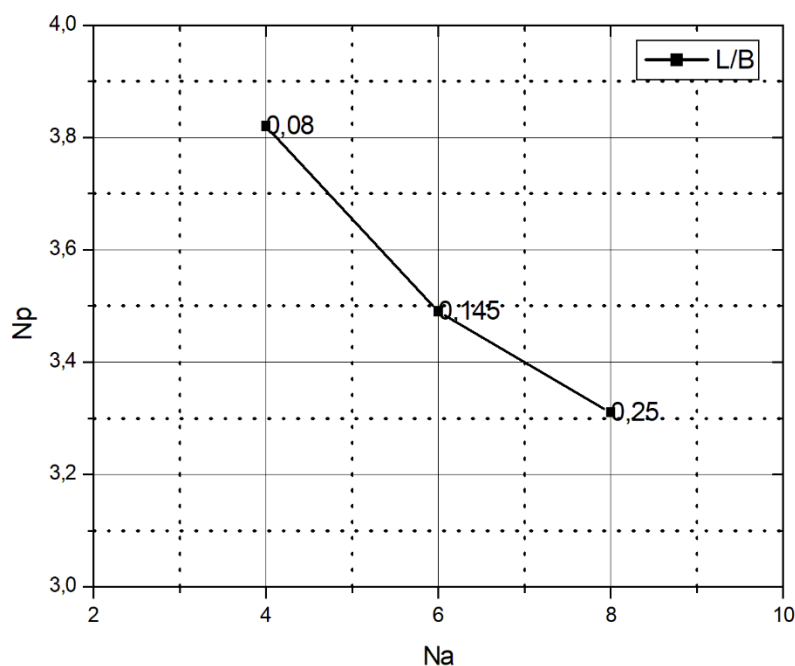
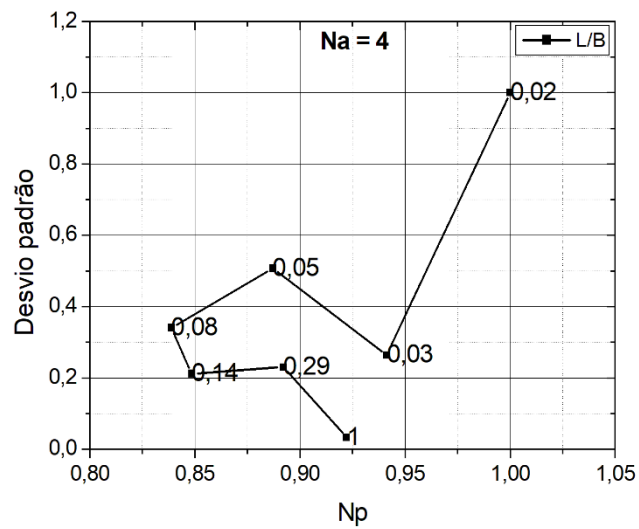


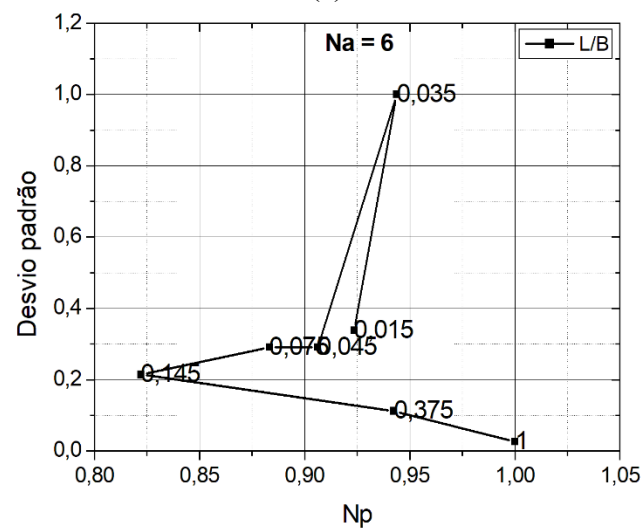
Figura 5.33 – Efeito de Na sobre o Np mínimo e a correspondente geometria ótima para cada caso.

Nota-se que, o tanque com 8 chicanas apresenta o menor valor de Np, sendo este valor alcançado quando a razão L/B é igual a 0,25.

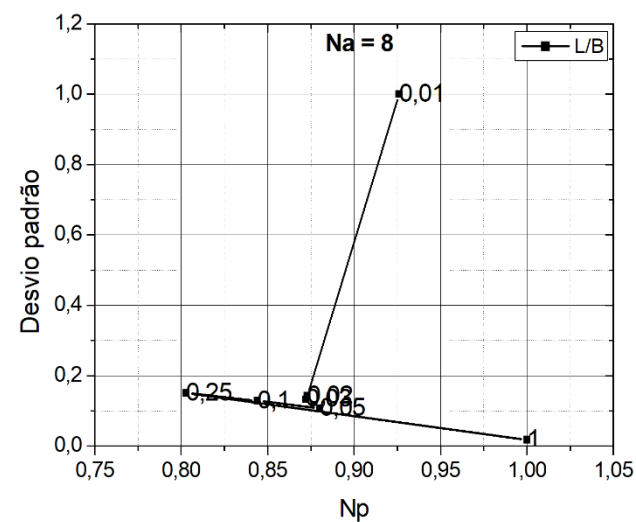
As Figuras 5.16, 5.22 e 5.27, mostram que o desvio padrão da fração de massa é sempre menor quando $L/B = 1$ ao passo que, para Np, Fig. 5.32, tem-se outras magnitudes ótimas de L/B. Isso indica que em uma análise multiobjetivo diferentes configurações ótimas podem ser sugeridas. Assim, a Fig. 5.34 mostra uma avaliação multiobjetivo, com a intenção de comparar o menor desvio padrão da fração de massa e o menor número de potência. Nessa análise, considera-se que, o ponto do gráfico que possui a menor distância a partir da origem, indica que este ponto possui o menor desvio padrão e o menor número de potência, simultaneamente. Deste modo, para o caso do tanque com 4 chicanas, Fig. 5.34(a), a razão L/B que possui os dois indicadores de performance com o menor valor, simultaneamente, é a razão $L/B = 0,14$. Para o caso de 6 chicanas, Fig. 5.34(b), é a razão $L/B = 0,145$, e para o caso com 8 chicanas, Fig. 5.34(c), é a razão $L/B = 0,25$.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.34 – Comparação entre desvio padrão da fração de massa e número de potência (N_p). (a) Tanque com 4 chicanas. (b) Tanque com 6 chicanas. (c) Tanque com 8 chicanas.

Com estes resultados, e pensando em termos de economia de energia juntamente com eficiência de mistura, pode-se sugerir que o tanque com 8 chicanas se mostrou mais atrativo, já que a homogeneização da mistura ocorre mais rapidamente, Tab. 5.6, do que os outros tanques, além de demonstrar os menores valores do desvio padrão e do número de potência, simultaneamente, para a razão $L/B = 0,25$. Além disso, essa razão é a que mais se aproxima da razão $L/B = 1$, razão esta que demonstrou diversos resultados indicando a melhor eficiência da mistura para todas as quantidades de chicanas.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou a simulação numérica do princípio de funcionamento de um tanque misturador. Para simular o movimento de rotação do impelidor, de maneira a reproduzir o fenômeno físico do problema, dois modelos numéricos foram desenvolvidos: (1) o modelo que se utiliza de malha móvel; e (2) o modelo que se utiliza da inserção de um termo fonte na equação da quantidade de movimento. Para o modelo com termo fonte, uma UDF foi desenvolvida, a fim de simular o movimento do impelidor sem a necessidade da utilização de uma malha móvel. Os dois modelos numéricos reproduziram de forma satisfatória os resultados numéricos e experimentais disponíveis na literatura, mostrando-se eficientes para representar o fenômeno físico do problema. No entanto, o modelo com termo fonte se mostrou mais atrativo pelo baixo custo computacional apresentado, cerca de 2% do esforço computacional requerido com o modelo que utiliza malha móvel.

Para o estudo da homogeneização da mistura no tanque, um modelo de transporte de espécie, sem reações químicas, foi utilizado. Para entender a influência das chicanas sobre a mistura, foi aplicado o método Design Construtal, que avaliou a influência das dimensões das chicanas sobre o escoamento. A aplicação deste método em estudos sobre tanques misturadores nunca foi apresentada anteriormente pela literatura, trazendo resultados inéditos para a contribuição no estado da arte.

Para cada razão L/B proposta pela aplicação do Design Construtal, foi avaliada a influência sobre os campos de velocidade, energia cinética da turbulência, tempo de homogeneização da mistura, distribuição do traçador no domínio do tanque e Número de Potência. Os resultados indicaram que o caso sem chicanas conduziu a uma mistura mais pobre e mais demorada. Ao passo que, a introdução de chicanas no interior do tanque, conduz a uma maior eficiência quando é obtido um equilíbrio na distribuição da energia cinética da turbulência e da fração de massa ao longo do domínio computacional, o que está de acordo com o princípio construtal da “Ótima Distribuição das Imperfeições”. Nos casos sem chicanas, a região da periferia apresenta baixas magnitudes de k , enquanto para elevadas inserções das chicanas, há uma grande formação de zonas mortas de escoamento, prejudicando o desempenho.

Considerando apenas o tempo de homogeneização e o desvio padrão da mistura, conclui-se que o tanque que demonstrou melhor performance foi o tanque com 4 chicanas e razão $L/B = 1$. Por outro lado, realizando uma breve avaliação sobre a influência do número de potência no tanque, e fazendo uma análise multiobjetivo entre desvio padrão e N_p , outros resultados foram obtidos. A análise demonstrou que o tanque com 8 chicanas e razão $L/B = 0,25$ parece mais atrativo, já que neste caso, os dois indicadores de performance (desvio padrão da fração de massa e número de potência)

foram minimizados simultaneamente.

No entanto, os valores de N_p , para esta análise, podem ser considerados subestimados por conta da não imposição de fronteiras física do impelidor, bem como, a falta de um termo fonte de potência. Assim, o ideal seria considerar mais um termo fonte de potência, adicionando a parcela perdida das informações e, assim, podendo avaliar com mais precisão o N_p . Essas considerações e o desenvolvimento de um código mais completo (considerando a fonte de potência do impelidor) podem ser levadas em conta e desenvolvidas em um trabalho futuro.

REFERÊNCIAS

ALFARO-AYALA, J. Arturo; AYALA-RAMÍREZ, Víctor; GALLEGOS-MUÑOZ, Armando; *et al.* Optimal location of axial impellers in a stirred tank applying evolutionary programming and CFD. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 100, p. 203–211, 2015.

ASME, 2009. Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer – V&V 20. ASME, NY, USA.

BAŞBUĞ, S.; PAPADAKIS, G.; VASSILICOS, J. C. Reduced mixing time in stirred vessels by means of irregular impellers. **Physical Review Fluids**, [s. l.], v. 3, n. 8, 2018a. Disponível em: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevFluids.3.084502>. Acesso em: 23 abr. 2019.

BAŞBUĞ, S.; PAPADAKIS, G.; VASSILICOS, J. C. Reduced power consumption in stirred vessels by means of fractal impellers. **AIChE Journal**, [s. l.], v. 64, n. 4, p. 1485–1499, 2018b.

BEJAN, A.; LORENTE, S. **Design with constructal theory**. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons, 2008.

BEJAN, A.; ZANE, J. P. **Design in nature: how the constructal law governs evolution in biology, physics, technology, and social organization**. New York: Anchor Books, 2012. *E-book*. Disponível em: <http://rbdigital.oneclickdigital.com>. Acesso em: 26 jun. 2019.

BIRINCI, Soner; SAGLAM, Mehmet; SARPER, Bugra; *et al.* Constructal design of heat sources with different heat generation rates for the hot spot mitigation. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 163, p. 120472, 2020.

CHAPPLE, D.; KRESTA, S.M.; WALL, A.; *et al.* The Effect of Impeller and Tank Geometry on Power Number for a Pitched Blade Turbine. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 80, n. 4, p. 364–372, 2002.

CHTOUROU, W. *et al.* Effect of the turbulence models on Rushton turbine generated flow in a stirred vessel. **Open Engineering**, [s. l.], v. 1, n. 4, 2011. Disponível em: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.2478/s13531-011-0039-0/html>. Acesso em: 13 set. 2021.

DA SILVEIRA, Thiago; PINTO, Vinícius; NEUFELD, João Pedro; *et al.* Applicability Evidence of Constructal Design in Structural Engineering: Case Study of Biaxial Elasto-Plastic Buckling of Square Steel Plates with Elliptical Cutout. **Journal of Applied and Computational Mechanics**, v. 7, n. 2, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.22055/jacm.2021.35385.2647>>. Acesso em: 28 jun. 2021.

DE MARTINI, T. L. **Influência dos impelidores e condições de mistura na produção de insumos químicos para o setor coureiro**. [S. l.: s. n.], 2010.

DOS SANTOS, Elizaldo D.; ISOLDI, Liércio A.; GOMES, Mateus das N.; *et al.* The Constructal Design Applied to Renewable Energy Systems. In: RINCÓN-MEJÍA, Eduardo; DE LAS HERAS, Alejandro (Orgs.). **Sustainable Energy Technologies**. 1. ed. [s.l.]: CRC Press, 2017, p. 45–62. Disponível em: <<https://www.taylorfrancis.com/books/9781351980685/chapters/10.1201/9781315269979-4>>. Acesso em: 15 jul. 2019.

DUTRA, Rafael F.; ZINANI, Flavia S. F.; ROCHA, Luiz A. O.; *et al.* Constructal design of an arterial bypass graft. **Heat Transfer**, v. 49, n. 7, p. 4019–4039, 2020.

DUTRA, R.F.; ZINANI, F.S.F.; ROCHA, L.A.O.; *et al.* Effect of non-Newtonian fluid rheology on an arterial bypass graft: A numerical investigation guided by constructal design. **Computer Methods and Programs in Biomedicine**, v. 201, p. 105944, 2021.

FAGUNDES, T. M.; LORENZINI, G.; ESTRADA, E. da S. D.; *et al.* Constructal Design of Conductive Asymmetric Tri-Forked Pathways. **Journal of Engineering Thermophysics**, v. 28, n. 1, p. 26–42, 2019.

FLUENT, A. **ANSYS FLUENT 12. 0 User's Guide**. [S. l.: s. n.], 2009.

FORTUNA, A. de O. **Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos: conceitos básicos e aplicações**. São Paulo: Edusp, 2000.

FOUKRACH, Mohammed; BOUZIT, Mohamed; AMEUR, Houari; *et al.* Effect of Agitator's Types on the Hydrodynamic Flow in an Agitated Tank. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, v. 33, n. 1, p. 37, 2020.

FOUKRACH, Mohammed; BOUZIT, Mohamed; AMEUR, Houari; *et al.* Influence of the vessel shape on the performance of a mechanically agitated system. **Chemical Papers**, v. 73, n. 2, p. 469–480, 2019.

FOUST; WENZEL; CLUMP; *et al.* **Princípios das Operações Unitárias**. 2ª. [s.l.]: LTC, 1982.

GONZALES, G.V.; LORENZINI, G.; ISOLDI, L.A.; *et al.* Constructal Design and Simulated Annealing applied to the geometric optimization of an isothermal Double T-shaped cavity. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 174, p. 121268, 2021.

HARNBY, N.; EDWARDS, M. F.; NIENOW, A. W. (org.). **Mixing in the process industries**. 2nd ed., pbk. eded. Oxford ; Boston: Butterworth-Heinemann, 1997.

HARTMANN, H.; DERKSEN, J. J.; VAN DEN AKKER, H. E. A. Mixing times in a turbulent stirred tank by means of LES. **AIChE Journal**, [s. l.], v. 52, n. 11, p. 3696–3706, 2006.

HUANG, W.; LI, K. CFD Simulation of Flows in Stirred Tank Reactors Through Prediction of Momentum Source. In: GUILLEN, D. (org.). **Nuclear Reactor Thermal Hydraulics and Other Applications**. [S. l.]: InTech, 2013. *E-book*. Disponível em: <http://www.intechopen.com/books/nuclear-reactor-thermal-hydraulics-and-other-applications/cfd-simulation-of-flows-in-stirred-tank-reactors-through-prediction-of-momentum-source>. Acesso em: 27 ago. 2018.

IMPIOMBATO, Andrea Natale; ZINANI, Flavia Schwarz Franceschini; ROCHA, Luiz Alberto Oliveira; *et al.* Projeto construtivo de um desvio arterial idealizado Gjangada: Efeito de o Bypass Attachment Point on Resistance to Flow. **Journal of Applied and Computational Mechanics**, v. 7, n. 1, p. 334–344, 2021.

JAVED, K. H.; MAHMUD, T.; ZHU, J. M. Numerical simulation of turbulent batch mixing

in a vessel agitated by a Rushton turbine. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, [s. l.], v. 45, n. 2, p. 99–112, 2006.

JONES, W. P.; LAUNDER, B. E. The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, [s. l.], v. 15, n. 2, p. 301–314, 1972.

JOSHI, Jyeshtharaj B.; NERE, Nandkishor K.; RANE, Chinmay V.; *et al.* CFD simulation of stirred tanks: Comparison of turbulence models. Part I: Radial flow impellers. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 89, n. 1, p. 23–82, 2011.

KOPELIOVICH, D. **Homogenization. SubsTech, Substances Technologies**. 2009.
Disponível em:
http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=homogenization#mechanical_homogenization.
Acesso em: 11 set. 2021.

LI, L.; XIANG, K.; XIANG, B. Numerical simulation of transient power consumption characteristics in an unbaffled stirred tank. **Chemical Papers**, [s. l.], v. 74, n. 9, p. 2849–2859, 2020.

LI, L.; XU, B. CFD simulation of local and global mixing time in an agitated tank. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, [s. l.], v. 30, n. 1, p. 118–126, 2017.

LORENZINI, G.; BARRETO, E.X.; BECKEL, C.C.; *et al.* Geometrical evaluation of T-shaped high conductive pathway with thermal contact resistance for cooling of heat-generating medium. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 108, p. 1884–1893, 2017.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2004.

MARTINS, J.C.; GOULART, M.M.; GOMES, M. das N.; *et al.* Geometric evaluation of the main operational principle of an overtopping wave energy converter by means of Constructal Design. **Renewable Energy**, v. 118, p. 727–741, 2018.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit operations of chemical engineering**. 5th eded. New York: McGraw-Hill, 1993. (McGraw-Hill chemical engineering series).

MOHIUDDIN, A. K. M.; ADEYEMI, N.; JAMEEL, A. T. Numerical Modelling of Mixed Flow Impeller in Stirred Vessel. *In*: ASME 2012 INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS AND EXPOSITION, 2012, Houston, Texas, USA. **Volume 7: Fluids and Heat Transfer, Parts A, B, C, and D**. Houston, Texas, USA: ASME, 2012. p. 2271.
Disponível em:
<http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?doi=10.1115/IMECE2012-89368>. Acesso em: 25 abr. 2019.

NAGATA, S. Power Characteristics of Mixing Impellers. **Journal of the Society of Mechanical Engineers**, [s. l.], v. 59, n. 446, p. 235–241, 1956.

OCHIENG, A.; ONYANGO, M. S. Homogenization energy in a stirred tank. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, [s. l.], v. 47, n. 9–10, p. 1853–1860, 2008.

PAUL, E. L.; ATIEMO-OBENG, V. A.; KRESTA, S. M. (org.). **Handbook of industrial mixing: science and practice**. Hoboken, N.J: Wiley-Interscience, 2004.

ROCHA, L. A. O.; LORENTE, S.; BEJAN, A. Constructal Theory in Heat Transfer. *In*: KULACKI, F. A. (org.). **Handbook of Thermal Science and Engineering**. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 1–32. *E-book*. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-32003-8_66-1. Acesso em: 27 jul. 2021.

ROY, S.; ACHARYA, S. Scalar mixing in a turbulent stirred tank with pitched blade turbine: Role of impeller speed perturbation. **Chemical Engineering Research and Design**, [s. l.], v. 90, n. 7, p. 884–898, 2012.

SCHLICHTING, H.; GERSTEN, K. **Boundary-layer theory**. 8., rev.enl. ed., corr. printed. Berlin: Springer, 2003. (Physics and astronomy online library).

TAMBURINI, A.; GAGLIANO, G.; MICALE, G.; *et al.* Direct numerical simulations of creeping to early turbulent flow in unbaffled and baffled stirred tanks. **Chemical Engineering Science**, v. 192, p. 161–175, 2018.

TILL, Zoltán; MOLNÁR, Bálint; EGEDY, Attila; *et al.* CFD Based Qualification of Mixing Efficiency of Stirred Vessels. **Periodica Polytechnica Chemical Engineering**, v. 63, n. 1, p. 226–238, 2018.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. Nachdr.ed. Harlow: Pearson/Prentice Hall, 2005.

YANG, F.; ZHOU, S.; WANG, G. Detached eddy simulation of the liquid mixing in stirred tanks. **Computers & Fluids**, [s. l.], v. 64, p. 74–82, 2012.

YAPICI, Kerim; KARASOZEN, Bulent; SCHÄFER, Michael; *et al.* Numerical investigation of the effect of the Rushton type turbine design factors on agitated tank flow characteristics. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 47, n. 8, p. 1340–1349, 2008.

YEOH, S. L.; PAPADAKIS, G.; YIANNESKIS, M. Determination of mixing time and degree of homogeneity in stirred vessels with large eddy simulation. **Chemical Engineering Science**, [s. l.], v. 60, n. 8–9, p. 2293–2302, 2005.

APÊNDICE

APÊNDICE 1 – Código utilizado para a imposição da fonte de quantidade de movimento.

```
1 #define _USE_MATH_DEFINES
2
3 #include "udf.h"
4
5 #include <math.h>
6 #include <float.h>
7
8
9 enum udms
10 {
11     RADIUS = 0,
12     THETA = 1,
13     SOURCE_R = 2,
14     SOURCE_THETA = 3
15 };
16
17 const int DOMAIN_ID = 1;
18 int impeller_id = -1;
19 real omega = 0.0;
20 real impeller_area = 0.0;
21 real impeller_volume = 0.0;
22 real impeller_minimum_radius = FLT_MAX;
23
24 real calculate_r(real x, real y)
25 {
26     return sqrt(x*x + y*y);
27 }
28
29 real calculate_theta(real x, real y)
30 {
31
32     if (x > 0.0)
33     {
34         return atan(fabs(y/x));
35     }
36     if (x < 0.0)
37     {
```

```

38     return atan(fabs(y/x)) + M_PI;
39 }
40
41 if (y > 0.0)
42 {
43     return M_PI_2;
44 }
45 if (y < 0.0)
46 {
47     return 3.0*M_PI_2;
48 }
49
50 return 0.0;
51 }
52
53 real calculate_vr(real vx, real vy, real theta)
54 {
55     return vx * cos(theta) + vy * sin(theta);
56 }
57
58 real calculate_vtheta(real vx, real vy, real theta)
59 {
60     return -vx * sin(theta) + vy * cos(theta);
61 }
62
63 real calculate_reynolds(real rho, real v, real x, real mu)
64 {
65     return rho * v * x / mu;
66 }
67
68 real calculate_friction_factor(real reynolds)
69 {
70     real re = reynolds + DBL_EPSILON;
71     if (reynolds <= 5.0e+05)
72     {
73         return 0.664 / sqrt(re);
74     }

```

```

75     else
76     {
77         return 0.0577 / pow(re, 0.2);
78     }
79 }
80
81 real calculate_source_r(real rho, real vr, real c_f, real ds)
82 {
83     return 1.0 / 2.0 * rho * vr * vr * c_f * ds;
84 }
85
86 real calculate_source_theta(real rho, real vtheta, real r, real ds)
87 {
88     real u = omega * r;
89
90     return rho * ds * u * (u - vtheta);
91 }
92
93 void calculate_cell_sources(cell_t cell, Thread *thread)
94 {
95
96     real rho = C_R(cell, thread);
97     real mu = C_MU_L(cell, thread);
98
99     real vx = C_U(cell, thread);
100    real vy = C_V(cell, thread);
101    real vr = calculate_vr(vx, vy, C_UDMI(cell, thread, THETA));
102    real vtheta = calculate_vtheta(vx, vy, C_UDMI(cell, thread, THETA));
103    real x = C_UDMI(cell, thread, RADIUS) - impeller_minimum_radius;
104
105    real reynolds = calculate_reynolds(rho, fabs(vr), x, mu);
106    real c_f = calculate_friction_factor(reynolds);
107
108
109    real ds = impeller_area / impeller_volume;
110
111

```

```

112     C_UDMI(cell, thread, SOURCE_R) = calculate_source_r(rho, vr, c_f, ds);
113
114
115     C_UDMI(cell, thread, SOURCE_THETA) =
116         calculate_source_theta(rho, vtheta, C_UDMI(cell, thread, RADIUS), ds);
117 }
118
119 DEFINE_INIT(convert_cylindrical, domain)
120 {
121     int n;
122     Thread* impeller_thread;
123     cell_t cell;
124     Node* node;
125     real centroid[ND_ND];
126     real r, theta;
127
128     #if !RP_NODE
129         char variables_ok = TRUE;
130
131         if (!RP_Variable_Exists_P("impeller-id"))
132         {
133             Message("\nError! Variable 'impeller-id not defined!\n");
134             Message("Define the variable using: (rp-var-define 'impeller-id ID 'integer #f)\n");
135             variables_ok = FALSE;
136         }
137         else
138         {
139             impeller_id = RP_Get_Integer("impeller-id");
140         }
141
142         if (!RP_Variable_Exists_P("impeller-area"))
143         {
144             Message("\nError! Variable 'impeller-area not defined!\n");
145             Message("Define the variable using: (rp-var-define 'impeller-area M2 'real #f)\n");
146             variables_ok = FALSE;
147         }
148         else
149         {
150             impeller_area = RP_Get_Real("impeller-area");
151         }
152
153         if (!RP_Variable_Exists_P("impeller-rotation"))
154         {
155             Message("\nError! Variable 'impeller-rotation not defined!\n");
156             Message("Define the variable using: (rp-var-define 'impeller-rotation RAD/S 'real #f)\n");
157             variables_ok = FALSE;
158         }
159         else
160         {
161             omega = RP_Get_Real("impeller-rotation");
162         }
163         if (variables_ok)
164         {
165             Message("\nRP Variables defined!\n");
166         }
167         else
168         {
169             Message("\nRP Variables undefined - create the variables and run the UDF again!\n");
170         }
171     #endif
172     host_to_node_int_1(impeller_id);
173     host_to_node_real_2(impeller_area, omega);
174
175     impeller_volume = 0.0;
176     impeller_minimum_radius = FLT_MAX;
177
178     impeller_thread = Lookup_Thread(domain, impeller_id);
179
180     begin_c_loop_int(cell, impeller_thread)
181     {
182         impeller_volume += C_VOLUME(cell, impeller_thread);
183         C_CENTROID(centroid, cell, impeller_thread);
184         C_UDMI(cell, impeller_thread, RADIUS) = calculate_r(centroid[0], centroid[1]);
185         C_UDMI(cell, impeller_thread, THETA) = calculate_theta(centroid[0], centroid[1]);

```

```

187
188     c_node_loop(cell, impeller_thread, n)
189     {
190         node = C_NODE(cell, impeller_thread, n);
191         impeller_minimum_radius =
192             fmin(impeller_minimum_radius, calculate_r(NODE_X(node), NODE_Y(node)));
193     }
194 }
195 end_c_loop_int(c, c_thread)
196
197 impeller_volume = PRF_GRSUM1(impeller_volume);
198 impeller_minimum_radius = PRF_GRLW1(impeller_minimum_radius);
199
200 node_to_host_real_2(impeller_minimum_radius, impeller_volume);
201
202 #if !RP_NODE
203     Message("\nImpeller Area = %.5e m2", impeller_area);
204     Message("\nImpeller Volume = %.5e m2", impeller_volume);
205     Message("\nImpeller Minimum Radius = %.5e m", impeller_minimum_radius);
206     Message("\nImpeller Rotation Speed = %.5e rad/s", omega);
207     Message("\n");
208 #endif
209
210
211 begin_c_loop_int(cell, impeller_thread)
212 {
213     calculate_cell_sources(cell, impeller_thread);
214 }
215 end_c_loop_int(c, c_thread)
216 }
217
218
219 DEFINE_ADJUST(calculate_sources, domain)
220 {
221     Thread *thread;
222     cell_t cell;

```

```

223
224     thread = Lookup_Thread(domain, impeller_id);
225     begin_c_loop_int(cell, thread)
226     {
227         calculate_cell_sources(cell, thread);
228     }
229     end_c_loop_int(c, c_thread)
230 }
231
232
233 DEFINE_SOURCE(radial_source_x, cell, thread, source_derivative, equation)
234 {
235     source_derivative[equation] = 0.0;
236     return C_UDMI(cell, thread, SOURCE_R) * cos(C_UDMI(cell, thread, THETA));
237 }
238
239 DEFINE_SOURCE(radial_source_y, cell, thread, source_derivative, equation)
240 {
241     source_derivative[equation] = 0.0;
242     return C_UDMI(cell, thread, SOURCE_R) * sin(C_UDMI(cell, thread, THETA));
243 }
244
245 DEFINE_SOURCE(tangential_source_x, cell, thread, source_derivative, equation)
246 {
247     source_derivative[equation] = 0.0;
248     return -C_UDMI(cell, thread, SOURCE_THETA) * sin(C_UDMI(cell, thread, THETA));
249 }
250
251 DEFINE_SOURCE(tangential_source_y, cell, thread, source_derivative, equation)
252 {
253     source_derivative[equation] = 0.0;
254     return C_UDMI(cell, thread, SOURCE_THETA) * cos(C_UDMI(cell, thread, THETA));
255 }

```

APÊNDICE 2 – Valores de N_p para cada razão L/B nos tanques com 4, 6 e 8 chicanas.

Tabela 0.1 - Valores de N_p para cada razão L/B - tanque com 4 chicanas.

L/B	N_p
1	4,20
0,29	4,06
0,14	3,86
0,08	3,82
0,05	4,04
0,03	4,29
0,02	4,55

Tabela 0.2 - Valores de N_p para cada razão L/B - tanque com 6 chicanas.

L/B	N_p
1	4,25
0,375	4,00
0,145	3,49
0,075	3,75
0,045	3,85
0,035	4,01
0,015	3,92

Tabela 0.3 - Valores de N_p para cada razão L/B - tanque com 8 chicanas.

L/B	N_p
1	4,13
0,25	3,31
0,1	3,49
0,05	3,63
0,03	3,60
0,02	3,60
0,01	3,82

