

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

Área de concentração:

DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS QUÍMICOS

**“Otimização do impelidor KPC utilizando Fluidodinâmica  
Computacional (CFD)”**

Autora: Ana Letícia Monteiro Olino

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Nunhez

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Química como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Campinas – São Paulo

Dezembro de 2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -  
UNICAMP

OL3o                      Olino, Ana Letícia Monteiro  
                              Otimização do impelidor KPC utilizando  
                              fluidodinâmica computacional (CFD) / Ana Letícia  
                              Monteiro Olino. --Campinas, SP: [s.n.], 2010.

                              Orientador: José Roberto Nunhez.  
                              Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de  
                              Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

                              1. Otimização. 2. Fluidodinâmica computacional  
                              (CFD). 3. Mistura. I. Nunhez, José Roberto. II.  
                              Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de  
                              Engenharia Química. III. Título.

Título em Inglês: Optimization of KPC impeller using computational fluid  
                              dynamics (CFD)

Palavras-chave em Inglês: Optimization, Computational fluid dynamics  
                              (CFD), Mixing

Área de concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos

Titulação: Mestre em Engenharia Química

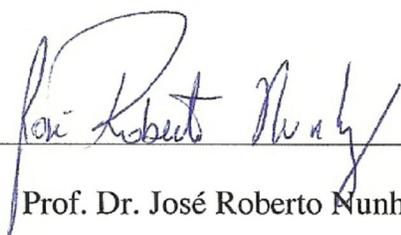
Banca examinadora: Celso Fernandes Joaquim Junior, Leonardo Machado  
                              da Rosa

Data da defesa: 09/12/2010

Programa de Pós Graduação: Engenharia Química

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

Dissertação de Mestrado defendida por Ana Leticia Monteiro Olino e aprovada em 9 de Dezembro de 2010 pela banca examinadora constituída pelos doutores:



---

Prof. Dr. José Roberto Nunhez



---

Prof. Dr. Celso Fernandes Joaquim Junior

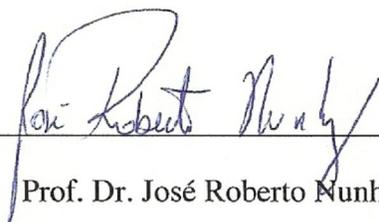


---

Dr. Leonardo Machado da Rosa

## **FOLHA DE VERSÃO FINAL**

Este exemplar corresponde à versão final da Dissertação de Mestrado em  
Engenharia Química.



---

Prof. Dr. José Roberto Nunhez

## DEDICATÓRIA E AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho a meus pais, que me proporcionaram todas as condições para que eu atingisse este objetivo.

Agradeço a Deus.

Ao meu marido e sempre companheiro Renato que não me deixou desistir e sempre me apoiou mesmo nos momentos mais difíceis.

Ao professor José Roberto Nunhez pela orientação e todo apoio.

Ao professor Celso Fernandes Joaquim Junior por toda ajuda prestada.

À minha grande amiga Gabriela pela paciência e ajuda durante todo o trabalho, sempre colocando minhas simulações para rodar quando eu estava longe.

Aos amigos Marcela, Stella, Leo, Max, pela ajuda e pelas boas risadas juntos.

A todos os companheiros de LCFD durante esses anos (Márcio, Cezar, Jefferson, Luís, Helver, Diener) pela companhia e ajuda.

À Capes e ao Cnpq pelo apoio financeiro.

“O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário”.

Albert Einstein

## RESUMO

Um impelidor ideal para suspensões deve prover a suspensão completa ou homogeneização utilizando o mínimo de energia. O fluxo em um tanque agitado depende da geometria do impelidor, do diâmetro e da localização deste, do diâmetro e do fundo do tanque e da geometria de internos. A Fluidodinâmica Computacional (CFD) é uma ferramenta poderosa para prever fluxos tridimensionais e distribuição de concentração de sólidos produzidos por impelidores de qualquer configuração geométrica.

Este estudo pretende aumentar a capacidade de bombeamento de um impelidor de bombeamento axial, chamado KPC, enquanto mantém o baixo consumo de potência. Para avaliar a capacidade de bombeamento do KPC, diferentes ângulos entre a raiz e a ponta das pás foram estudados. O ângulo da raiz foi mantido em  $45^\circ$ , enquanto o ângulo da ponta da pá foi modificado, resultando em diferentes pás. As simulações em CFD foram feitas com água e com água e areia. O modelo de turbulência utilizado foi o *Shear Stress Transport* (SST) e foi utilizada a técnica de simulação *Sliding Grid*. O modelo escolhido para as simulações foi validado experimentalmente.

O descolamento da camada limite na ponta das pás dos impelidores foi visualizado, e o objetivo principal do trabalho, encontrar o impelidor KPC otimizado, foi atingido. Este impelidor possui  $45^\circ$  na raiz da pá e  $10^\circ$  na ponta da pá.

O impelidor otimizado confirmou seu melhor desempenho quando comparado ao impelidor inicial na simulação de uma suspensão de areia e água.

Palavras-chave: mistura, otimização, CFD.

## **ABSTRACT**

An ideal impeller for solid suspension should provide complete suspension or homogenization consuming a minimum of energy. The flow in a stirred tank depends on impeller design, diameter and the location of impellers, vessel diameter, bottom design and internals. Computational Fluid Dynamics (CFD) is a powerful tool to predict the three dimensional flow and solids concentration distribution produced by different impellers of any geometric configuration.

This study aims to improve the pumping of an axial pumping impeller, named KPC, while maintaining low power consumption. In order to evaluate the pumping capacity of the KPC impeller, different angles between the root and the tip of the blades have been studied. The angle at the root was maintained at  $45^\circ$ , and the angle at the blade tip has been modified, resulting in different blades. CFD simulations were performed for water and for water and sand. The model used the Shear Stress Transport (SST) turbulence model and the Sliding Grid simulation strategy. The model was validated against experimental data.

The impeller blade flow separation was visualized, and the main objective of the work, which was to find the optimized KPC impeller, was reached. This impeller possess  $45^\circ$  in the blade root and  $10^\circ$  in the tip of the blade.

The optimized impeller confirmed its better performance when compared to the initial impeller in a simulation of a suspension of sand and water.

Key words: Mixing, optimization, CFD.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>10</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>12</b>
<b>NOMENCLATURA.....</b>	<b>13</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>18</b>
1.1. AGITAÇÃO E MISTURA .....	18
1.2. SISTEMAS SÓLIDO-LÍQUIDO .....	21
1.3. FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD) .....	24
1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	25
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>27</b>
2.1. SUSPENSÃO DE SÓLIDOS – TRABALHOS EXPERIMENTAIS .....	27
2.2. SUSPENSÃO DE SÓLIDOS – TRABALHOS COM CFD .....	31
<b>3. MODELAGEM MATEMÁTICA E MÉTODOS NUMÉRICOS.....</b>	<b>35</b>
3.1. MODELAGEM MATEMÁTICA .....	35
3.1.1. <i>Equações de Conservação</i> .....	35
3.1.2. <i>Força de Arraste</i> .....	38
3.1.3. <i>Modelo de turbulência SST (Shear Stress Transport)</i> .....	40
3.1.4. <i>Modelo Alternate Rotation Model</i> .....	44
3.1.5. <i>Modelo Frozen Rotor</i> .....	45
3.2. MÉTODOS NUMÉRICOS .....	46
3.2.1. <i>Método dos Volumes Finitos</i> .....	46
3.2.2. <i>Procedimento Computacional</i> .....	46
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>48</b>
4.1. ENSAIOS NO TANQUE PILOTO.....	48
4.1.1. <i>Materiais e métodos</i> .....	48
4.1.2. <i>Resultados Experimentais</i> .....	50
4.2. SIMULAÇÕES.....	51
4.2.1. <i>Geração da malha</i> .....	53
4.2.2. <i>Condições de Contorno das Simulações</i> .....	57
4.2.3. <i>Validação Numérica</i> .....	58
4.2.4. <i>Simulações com Água</i> .....	60
4.2.5. <i>Simulações com Areia e Água</i> .....	67
<b>5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>72</b>
5.1. CONCLUSÕES .....	72
5.2. TRABALHOS FUTUROS.....	72
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>74</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1. REGIMES DE FLUXO. (A) FLUXO RADIAL. (B) FLUXO AXIAL. (C) REGIME LAMINAR (JOAQUIM JUNIOR ET AL, 2007). .....	19
FIGURA 1.2. FORMAÇÃO DE VÓRTICE. (A) VISTA LATERAL. (B) VISTA SUPERIOR.(JOAQUIM JUNIOR ET AL, 2007).....	20
FIGURA 1.3. REGIMES DE SUSPENSÃO. (A) SUSPENSÃO INCOMPLETA. (B) SUSPENSÃO COMPLETA. (C) SUSPENSÃO UNIFORME (PAUL ET AL, 2004). 22	
FIGURA 4.1. TANQUE PILOTO UTILIZADO NOS ENSAIOS. ....	50
FIGURA 4.2. CURVAS DE POTÊNCIA PARA O IMPELIDOR KPC EM TANQUE COM TRÊS CHICANAS, PARA OS TRÊS ENSAIOS REALIZADOS.....	51
FIGURA 4.3. CONFIGURAÇÃO DO TANQUE AGITADO.....	52
FIGURA 4.4. IMPELIDOR KPC.....	53
FIGURA 4.5. ESPESSURA DA CAMADA LIMITE (BRUNETTI, 2004).....	54
FIGURA 4.6. PLANO HORIZONTAL DA MALHA GERADA NO DOMÍNIO DO IMPELIDOR.....	56
FIGURA 4.7. DETALHE DA CAMADA DE PRISMAS NA PÁ DO IMPELIDOR. .	56
FIGURA 4.8. DETALHE DA MALHA NO DOMÍNIO DO TANQUE.....	57
FIGURA 4.9. NÚMERO DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE REYNOLDS. ....	59
FIGURA 4.10. ÂNGULO DA PONTA DA PÁ, EM VERMELHO, E DA RAIZ, EM AZUL.....	61
FIGURA 4.11. GEOMETRIAS DOS IMPELIDORES KPC. (A) ÂNGULO NA PONTA DA PÁ DE 25° (B) IMPELIDOR COM ÂNGULO DE 15°. (C) ÂNGULO NA PONTA DE 10°. (D) ÂNGULO NA PONTA DE 9°. (E) ÂNGULO NA PONTA DE 8°. (F) ÂNGULO NA PONTA DE 7°. ....	62
FIGURA 4.12. COMPARAÇÃO DE CONSUMO PARA VÁRIOS ÂNGULOS DE PONTA DE PÁ. ....	64
FIGURA 4.13. IMPELIDOR KPC OTIMIZADO.....	64
FIGURA 4.14. PLANO DE VELOCIDADES DO IMPELIDOR ORIGINAL. ....	65
FIGURA 4.15. PLANO DE VELOCIDADES DO IMPELIDOR KPC OTIMIZADO. ....	65
FIGURA 4.16. LINHAS DE CORRENTE DO IMPELIDOR KPC ORIGINAL.....	66
FIGURA 4.17. LINHAS DE CORRENTE DO IMPELIDOR KPC OTIMIZADO. ...	67
FIGURA 4.18. CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS NO TANQUE COM O IMPELIDOR ORIGINAL.....	69
FIGURA 4.19. CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS NO TANQUE COM O IMPELIDOR OTIMIZADO. ....	69

**FIGURA 4.20. VOLUME DE CONTROLE NO FUNDO DO TANQUE. .... 70**

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1. PROCESSOS DE MISTURA (NAGATA, 1975).....	18
TABELA 4.1. PROPRIEDADES DA ÁGUA.....	48
TABELA 4.2. DIMENSÕES DO TANQUE DE MISTURA UTILIZADO NO EXPERIMENTO.....	49
TABELA 4.3. CONDIÇÕES DE CONTORNO. ....	58
TABELA 4.4. VALORES DE NÚMERO DE POTÊNCIA EXPERIMENTAL E SIMULADOS E DESVIOS. ....	60
TABELA 4.5. CONSTANTES UTILIZADAS PARA O CÁLCULO DOS NÚMEROS ADIMENSIONAIS. ....	63
TABELA 4.6. VALORES PARA O CÁLCULO DO CONSUMO DOS IMPELIDORES.....	63
TABELA 4.7. PROPRIEDADES DA AREIA E DO IMPELIDOR.....	68
TABELA 4.8. CONCENTRAÇÕES NO VOLUME DE CONTROLE.....	71

# NOMENCLATURA

## Letras Latinas

A	Área da pá	$m^2$
$A_p$	Área da partícula	$m^2$
$A_{\alpha\beta}$	Área superficial por unidade de volume	$m^2 \cdot m^3$
b	Largura da chicana	m
C	Distância entre o impelidor e o fundo do tanque	m
$C_D$	Coefficiente de arraste	$kg \cdot m^3 \cdot s^{-1}$
$CD_{k\omega}$	Porção positiva do termo de difusão cruzada	-
$C_{\alpha\beta}^{(d)}$	Coefficiente de arraste entre as fases	$kg \cdot s^{-1}$
$d_p$	Diâmetro da partícula	m
D	Diâmetro do impelidor	m
desv	Desvio normalizado dos resultados das simulações com relação aos dados experimentais	-
$D_P$	Arrasto exercido por uma partícula na fase contínua	$kg \cdot m \cdot s^{-2}$
$D_{\alpha\beta}$	Força de arrasto por unidade de volume	$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-2}$
$F_1$	Função de combinação do modelo de turbulência	-
$F_2$	Função de combinação do modelo de turbulência	-
g	Aceleração da gravidade	$m \cdot s^{-2}$
H	Altura de líquido	m
k	Energia cinética turbulenta	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot kg$
$M_\alpha$	Força total imposta à fase $\alpha$ devido à interação com as outras	
fases		$kg \cdot m \cdot s^{-2}$

$M_{\alpha\beta}$	Força entre o par de fases $\alpha$ e $\beta$	$\text{kg.m.s}^{-2}$
$M_{\alpha\beta}^D$	Força de arrasto entre as fases	$\text{kg.m.s}^{-2}$
$n_p$	Número de partículas por unidade de volume	$\text{m}^{-3}$
$N$	Velocidade rotacional	$\text{s}^{-1}$
$N_P$	Número de potência	-
$N_Q$	Número de bombeamento	-
$p$	Pressão estática	$\text{kg.m}^{-1}\text{s}^{-2}$
$P$	Potência	$\text{kg.m}^2.\text{s}^{-3}$
$P_k$	Limitador de produção	$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-3}$
$p_\alpha$	Pressão na fase $\alpha$ .	$\text{kg.m}^{-1}\text{s}^{-2}$
$Q$	Bombeamento	$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
$r$	Vetor de localização – raio	$\text{m}$
$r_c$	Fração volumétrica da fase contínua	-
$r_\alpha$	Fração volumétrica da fase $\alpha$	-
$r_\beta$	Fração volumétrica da fase $\beta$	-
$Re$	Número de Reynolds	-
$Re'$	Número de Reynolds modificado da correlação de Wen Yu	-
$S$	Taxa de deformação	$\text{s}^{-1}$
$S_{\text{cfg}}$	Fonte de quantidade de movimento devido à força	
centrífuga		$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-3}$
$S_{\text{cor}}$	Fonte de quantidade de movimento devido à força de	
coriolis		$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-3}$
$S_m$	Representa fontes de quantidade de movimento devido a forças	
externas		$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-3}$

$S_{M,rot}$	Fonte de quantidade de movimento devido à forças rotacionais	$kg.m^{-1}.s^{-3}$
$S_{M\alpha}$	Fonte de quantidade de movimento na fase $\alpha$ devido à forças externas	$kg.m^{-1}.s^{-3}$
$S_{MS\alpha}$	Representa possíveis fontes de massa da fase $\alpha$	kg
t	tempo	s
T	Diâmetro interno do tanque	m
u	Velocidade vetorial	$m.s^{-1}$
U	Velocidade (módulo)	$m.s^{-1}$
$U_{abs}$	Velocidade absoluta	$m.s^{-1}$
$U_c$	Velocidade da fase contínua	$m.s^{-1}$
$U_d$	Velocidade da fase descontínua	$m.s^{-1}$
$U_T$	Velocidade terminal	$m.s^{-1}$
$\vec{U}_i$	Vetor velocidade na direção i	$m.s^{-1}$
$\vec{U}_j$	Vetor velocidade na direção j	$m.s^{-1}$
$\vec{U}_\alpha$	Vetor velocidade da fase $\alpha$	$m.s^{-1}$
$\vec{U}_\beta$	Vetor velocidade da fase $\beta$	$m.s^{-1}$
$V_p$	Volume da partícula	$m^3$
w	Largura da pá	m
$X_i$	Coordenada cartesiana	-
y	Distância até a parede	m
$y^+$	Medida adimensional da distância da parede	-

## Letras gregas

$\alpha$	Constante do modelo de turbulência	-
$\alpha_1$	Constante do modelo de turbulência	-
$\beta$	Constante do modelo de turbulência	-
$\beta^*$	Constante do modelo de turbulência	-
$\delta$	Matriz identidade	-
$\Delta n$	Distância entre o primeiro e o segundo nó da malha da parede	m
$\mu$	Viscosidade dinâmica	$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$
$\mu_\alpha$	Viscosidade da fase $\alpha$	$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$
$\mu_c$	Viscosidade da fase contínua	$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$
$\mu_t$	Viscosidade dinâmica turbulenta	$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$
$\nu$	Viscosidade cinemática	$\text{m}^2.\text{s}$
$\Omega$	Frequência turbulenta	$\text{s}^{-1}$
$\rho$	Densidade	$\text{kg.m}^{-3}$
$\rho_c$	Densidade da fase contínua	$\text{kg.m}^{-3}$
$\rho_p$	Densidade da partícula	$\text{kg.m}^{-3}$
$\rho_\alpha$	Densidade da fase $\alpha$	$\text{kg.m}^{-3}$
$\sigma_k$	Constante do modelo de turbulência	-
$\sigma_\omega$	Constante do modelo de turbulência	-
$\sigma_{\omega 2}$	Constante do modelo de turbulência	-
$\nu_t$	Viscosidade turbulenta	$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$
$\tau_\omega$	Tensão de cisalhamento na parede	$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$
$\Gamma_{\alpha\beta}$	Fluxo mássico por unidade de volume da fase $\beta$ para fase $\alpha$	$\text{kg.s}^{-1}$

$\Gamma_{\beta\alpha}$	Fluxo mássico por unidade de volume da fase $\alpha$ para fase $\beta$	$\text{kg.s}^{-1}$
$\omega$	Velocidade angular	$\text{rad.s}^{-1}$
$\omega'$	Vorticidade absoluta	$\text{s}^{-1}$

## **Siglas**

CFD	Fluidodinâmica Computacional
KPC	Impelidor de fluxo axial
LDV	Velocímetro <i>laser-doppler</i>
LES	Large Eddy Simulation
RSTM	Reynolds Stress Transport Model
SST	<i>Shear Stress Transport</i>

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Agitação e Mistura

A agitação é uma das operações mais comuns e antigas da Engenharia, e tem um importante papel na indústria química. A maioria dos produtos industriais necessita de algum tipo de agitação durante sua preparação e/ou aplicação. As indústrias alimentícia, petroquímica, farmacêutica, de papel e química possuem produtos que não seriam possíveis de serem formulados se não houvesse a mistura em seu processamento. Além disso, os misturadores também são essenciais no tratamento de resíduos industriais.

A operação de agitação deve ser analisada de diversos ângulos e, em cada caso, deve-se verificar qual é a etapa crítica do processo em estudo. Entre os sistemas que promovem a agitação, o mais utilizado é aquele provido de tanques com impelidores que contém líquidos de viscosidades baixas e moderadas.

A agitação é um processo que fornece movimento ao líquido e auxilia a realização dos processos químicos e processamentos físicos de diferentes aplicações.

As aplicações de mistura podem ser divididas em cinco grupos, conforme a tabela abaixo, citada por NAGATA (1975).

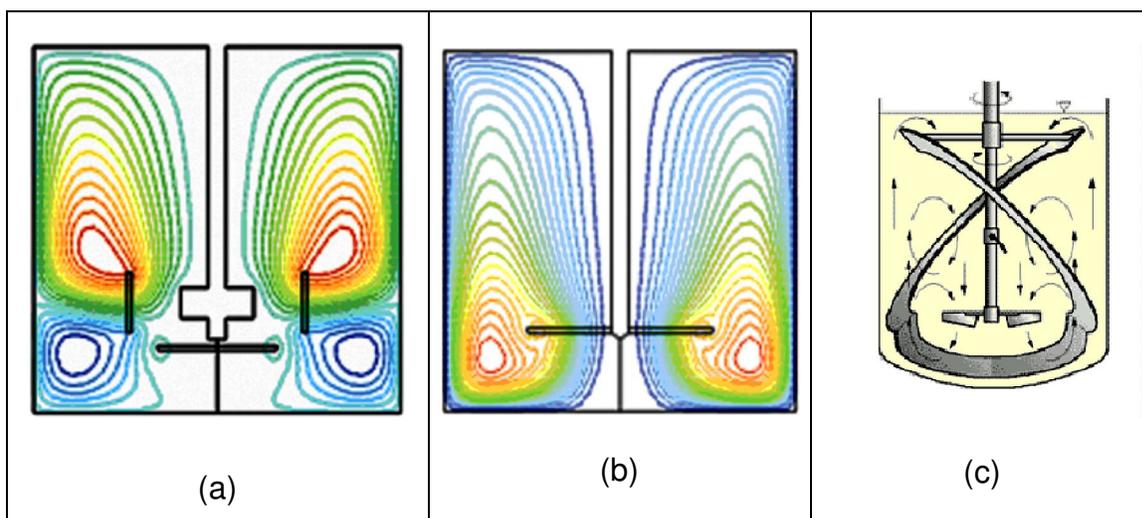
**Tabela 1.1.** Processos de mistura (NAGATA, 1975).

Processamento Físico	Classe de aplicação	Processamento Químico
Suspensão	Líquido-sólido	Dissolução
Dispersão	Líquido-gás	Absorção
Emulsão	Líquidos imiscíveis	Extração
Mistura	Líquidos miscíveis	Reação
Bombeamento	Movimentação de fluido	Transferência de calor

Existem diferentes tipos de impelidores para diferentes aplicações. Eles são classificados por seu regime de escoamento, que pode ser laminar ou turbulento.

O diâmetro dos impelidores de escoamento laminar se aproxima do diâmetro do tanque, e as chicanas não são utilizadas nestes casos.

Os impelidores turbulentos possuem dois padrões diferentes de fluxo em um tanque de mistura, o radial e o axial. Os impelidores de fluxo radial geram componentes de velocidade em duas direções, paralelas e perpendiculares ao impelidor, formando dois estágios de fluxo, um acima e outro abaixo do impelidor. Os impelidores axiais geram um fluxo que percorre todo o tanque, em um só estágio. A Figura 1.1 ilustra os tipos de fluxo.



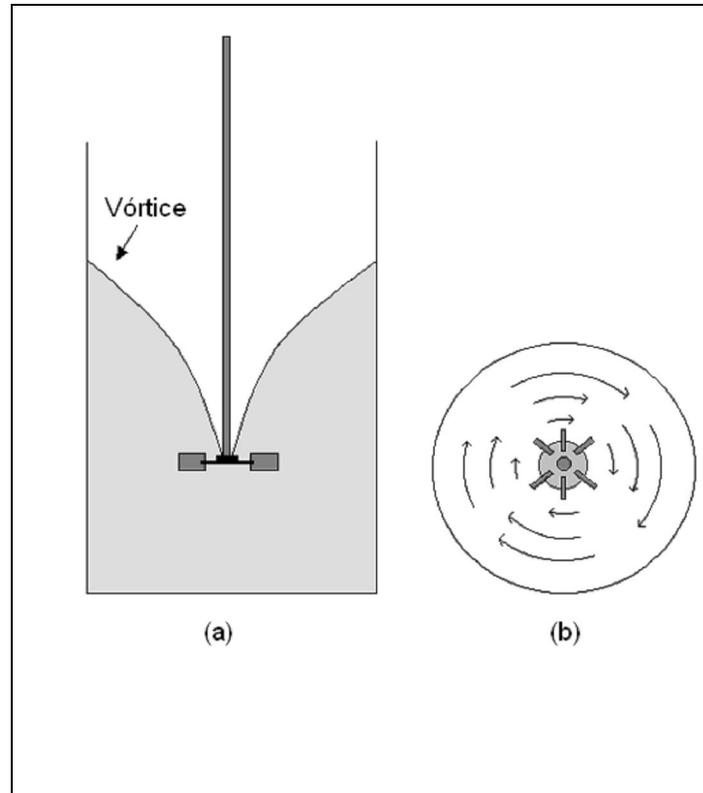
**Figura 1.1.** Regimes de fluxo. (a) Fluxo radial. (b) Fluxo axial. (c) Regime laminar (JOAQUIM JUNIOR et al, 2007).

A potência gerada pelos impelidores é transferida para o fluido e pode ser utilizada para bombear ou cisalhar, dependendo do tipo de impelidor. Diferentes aplicações podem requerer cisalhamento ou bombeamento. Por exemplo, em misturas gás-líquido, um alto cisalhamento é desejado para quebrar as bolhas e aumentar a transferência de massa. Já na operação de cristalização, apenas o bombeamento é requerido, uma vez que os cristais devem ser suspensos e a quebra de cristais não é desejada.

Existem vários fatores que influenciam a eficiência da agitação, entre eles a presença de chicanas. Em um tanque sem chicanas, a tensão de cisalhamento entre o agitador e o fluido é baixa, causando a formação de vórtices, que é a

movimentação circular do fluido. Com isso, pode ocorrer derramamento de material para fora do tanque e a penetração de ar. (JOAQUIM JUNIOR et al, 2007).

A Figura 1.2 mostra a formação do vórtice.



**Figura 1.2.** Formação de vórtice. (a) Vista lateral. (b) Vista superior.(JOAQUIM JUNIOR et al, 2007).

A presença de chicanas aumenta o cisalhamento e a transferência de potência para o fluido, diminuindo a “rotação sólida”, que ocorre quando o fluido gira junto com o impelidor e não ocorre mistura.

Existem números adimensionais importantes na operação de agitação e mistura. O consumo de potência de um impelidor em um tanque agitado pode ser previsto pelo seu número de potência; e sua capacidade de bombeamento é medida pelo número de bombeamento. Estes grupos adimensionais são expressos pelas Equações 1.1 e 1.2 (NAGATA, 1975, OLDSHUE e HERBST, 1995), respectivamente. A Equação 1.3 define o número de Reynolds para tanques agitados.

$$N_p = \frac{P}{N^3 D^5 \rho} \quad (1.1)$$

$$N_Q = \frac{Q}{ND^3} \quad (1.2)$$

$$Re = \frac{ND^2 \rho}{\mu} \quad (1.3)$$

Em que:

$N_p$	Número de potência;
$P$	Potência;
$N$	Velocidade rotacional;
$D$	Diâmetro do impelidor;
$\rho$	Densidade;
$N_Q$	Número de bombeamento;
$Q$	Bombeamento;
$Re$	Número de Reynolds;
$\mu$	Viscosidade dinâmica.

A operação de mistura pode ser dividida em diversos agrupamentos, como dispersão de gases, suspensão de sólidos e misturas líquidas. Cada uma das áreas de agitação tem suas próprias regras, critério de scale-up, aplicação prática e área de pesquisa. Este trabalho irá focar na suspensão de sólidos.

## 1.2. Sistemas Sólido-Líquido

Em operações como cristalização ou reações líquidas com catalisadores sólidos, é necessário suspender partículas sólidas em um líquido com viscosidade relativamente baixa. Isto pode ser alcançado em tanques agitados mecanicamente, onde a agitação é utilizada para prevenir a sedimentação de sólidos e para prover condições para boa transferência de massa entre sólido e líquido e/ou reações químicas. Se a agitação for parada, os sólidos irão

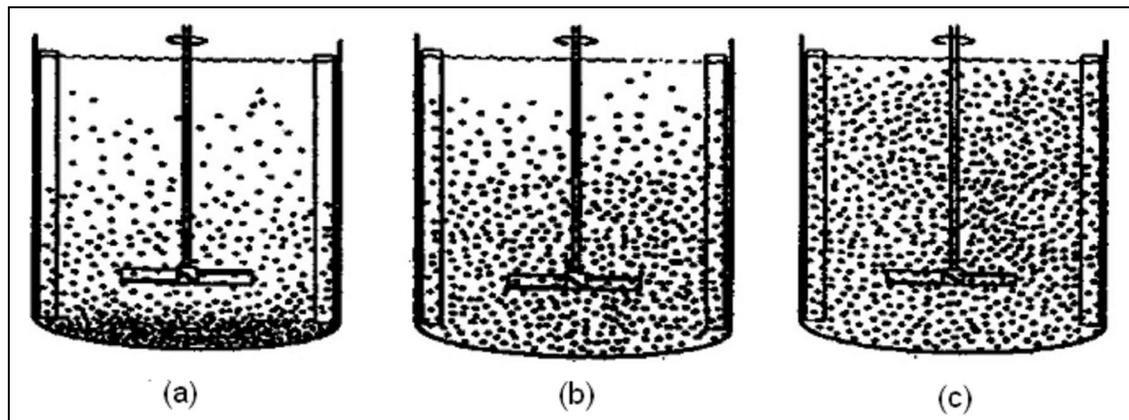
sedimentar ou flotar na superfície, dependendo das densidades relativas das fases líquida e sólida (HARNBY et al, 1992).

Os objetivos principais da agitação em sistemas sólido-líquido podem ser classificados em duas categorias:

- 1) Suspensão uniforme das partículas sólidas no líquido;
- 2) Suspensão de todas as partículas sólidas no líquido.

A suspensão uniforme das partículas não é facilmente alcançada, e nem sempre requerida, entretanto, existem alguns casos em que ela é desejada. Um exemplo desta aplicação é a utilização de um tanque de mistura para alimentar uma suspensão continuamente a um reator.

O segundo objetivo geralmente é mais importante para a dissolução e para reações químicas de sólidos em líquidos. A Figura 1.3 representa os estados de suspensão existentes.



**Figura 1.3.** Regimes de suspensão. (a) Suspensão incompleta. (b) Suspensão completa. (c) Suspensão uniforme (PAUL et al, 2004).

A velocidade crítica de agitação, que foi definida por ZWIETERING (1957), é a rotação onde nenhuma partícula permanece parada no fundo do tanque por mais de dois segundos. Abaixo desta velocidade, a interface total das partículas não está em contato com o líquido, e conseqüentemente, não está sendo completamente ou eficientemente utilizada. Acima da velocidade crítica de suspensão, a transferência de massa entre sólido-líquido aumenta vagarosamente

com o aumento da velocidade. Portanto, esta medida é uma base importante da intensidade da agitação e deve ser determinada para cada caso, pois varia com o tamanho e a forma do impelidor e do tanque.

Em um tanque agitado, pelo menos quatro forças mais relevantes agem em uma partícula: a força gravitacional, devido ao peso da partícula e ao efeito da flutuabilidade; a força inercial, devido ao movimento rotacional; a força viscosa, devido ao atrito do líquido na superfície das partículas; e a força friccional, devido à colisão entre as partículas. A força gravitacional move a partícula para o fundo do tanque, mas a força centrífuga move o líquido radialmente para fora do eixo do impelidor. A força de arrasto nas partículas tende a movê-las na direção do líquido. Esta força de arrasto também tende a modificar a direção do fluxo do líquido e as flutuações da velocidade turbulenta. A suspensão de uma partícula do fundo de um tanque agitado provavelmente ocorre por causa das flutuações turbulentas próximas da região, onde não existem velocidades na direção ascendente (BISWAS et. al, 1999).

Quando a concentração de sólidos é alta, geralmente ocorre a formação de filetes de partículas no centro do fundo e na periferia do tanque. Estes filetes são persistentes e necessitam de um aumento considerável na potência para serem suspensos. Nem sempre este aumento na potência é economicamente viável, e o preenchimento dessas áreas com o material do tanque pode ser uma alternativa (JOAQUIM JUNIOR et al, 2007).

O objetivo deste trabalho será otimizar o impelidor KPC, que é um impelidor de fluxo axial, variando o ângulo entre a pá e o eixo e o ângulo da ponta da pá, de modo que se diminua a velocidade mínima de suspensão.

As características locais de uma suspensão sob agitação são muito importantes, onde muitos fenômenos estão envolvidos, e a geometria de um tanque agitado eficiente requer o entendimento da mecânica do fluido dentro deste. Para isto, será utilizada a ferramenta da fluidodinâmica computacional.

### 1.3. Fluidodinâmica Computacional (CFD)

Fluidodinâmica Computacional (CFD) é a simulação numérica de fenômenos que envolvem o escoamento de fluidos. Aplicações industriais desta técnica de análise e simulação de processos iniciaram a partir de 1995 (HAMILL, 1996) em situações denominadas de “gargalos” de processo, principalmente na indústria petroquímica. Nestes casos, uma parte do processo, um equipamento ou um acessório, é analisado individualmente com a finalidade de obter-se informações sobre os padrões de escoamento que possam subsidiar um estudo de incremento de desempenho.

Alguns exemplos de onde a técnica CFD pode ser utilizada, segundo SOARES (2005), são:

- aerodinâmica de espaçonaves e veículos;
- hidrodinâmica de navios;
- combustão em motores e turbinas a gás;
- fluxo dentro de difusores;
- resfriamento de equipamentos, incluindo micro-circuitos;
- engenharia de processos químicos: mistura e separação, modelagem de polímeros;
- engenharia de meio-ambiente: distribuição dos poluentes e efluentes;
- hidrologia e oceanografia: fluxos em rios, estuários e oceanos;
- meteorologia: previsão do tempo;
- engenharia biomédica: fluxo de sangue através de artérias e veias;
- rotores de bombas visando a otimização da geometria;
- trocadores de calor, com o intuito de se maximizar a troca térmica por análise dos efeitos da utilização de chicanas e aletas e de configurações geométricas alternativas;

- ciclones das unidades de craqueamento catalítico de petróleo (FCC) com a finalidade de se desenvolver projetos com alta eficiência de coleta e reduzida queda de pressão;

- reatores tanques agitados como modelo não ideal de reator para a previsão de zonas mortas e de circulação e dos efeitos das chicanas e dos agitadores nas condições de mistura; entre outros.

O modelo matemático é baseado nas equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia. Estas equações são submetidas a condições iniciais e de contorno, e representam um problema particular. A solução analítica destas equações somente é possível para escoamentos muito simples. Para se analisar problemas reais, lança-se mão do uso dos chamados métodos numéricos.

Os métodos tradicionais para a solução numérica de equações diferenciais são os Métodos de Diferenças Finitas, de Volumes Finitos e de Elementos Finitos. Nos pacotes comerciais, o Método dos Volumes Finitos é empregado em todos aqueles com penetração industrial. A preferência é em função da robustez, devido às suas características conservativas (MALISKA, 2004).

Através de simulações com CFD podem-se prever dados como consumo de potência, padrão de escoamento e a concentração de sólidos ao longo do tanque.

#### **1.4. Organização do Trabalho**

O objetivo deste trabalho é otimizar a pá do impelidor KPC de modo que a suspensão de sólidos ocorra com um menor consumo de potência.

Para isto, o trabalho será dividido em duas partes: uma experimental, e uma computacional. Após encontrar os modelos que melhor representem a situação física real, se iniciará a otimização da pá do impelidor KPC. Para tanto, serão feitas mudanças nos ângulos na ponta da pá e na haste.

A apresentação desta dissertação é feita em capítulos, distribuídos da seguinte maneira:

Capítulo 1 - Introdução: Neste capítulo apresenta-se uma breve descrição das aplicações dos tanques de mistura, e mais especificamente da suspensão de sólidos, e explica a fluidodinâmica computacional (CFD).

Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica: Apresenta-se uma revisão de alguns dos mais relevantes trabalhos publicados na literatura sobre suspensão de sólidos em tanques de mistura, tanto experimentais quanto utilizando a técnica de simulação em CFD.

Capítulo 3 – Modelagem Matemática e Métodos Numéricos: Neste capítulo abordam-se a modelagem matemática, onde são apresentadas as equações que governam o fenômeno, o Método dos Volumes Finitos, o procedimento computacional e as condições de contorno utilizadas nas simulações.

Capítulo 4 – Resultados e Discussões: Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais, a validação do modelo numérico e os resultados numéricos das simulações para otimização do impelidor KPC, realizadas no software comercial ANSYS/CFX 12<sup>tm</sup>. Os resultados estão divididos em simulações com água e simulações com suspensão de areia.

Capítulo 5 – Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros: Apresentam-se as principais conclusões advindas do desenvolvimento deste trabalho e propostas para a continuação do mesmo.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Suspensão de sólidos – Trabalhos experimentais

Uma das aplicações dos tanques agitados é a suspensão de sólidos em um líquido. Os requisitos para a homogeneidade da suspensão variam de acordo com o propósito da operação. Algumas vezes um alto grau de homogeneidade é requerido; por exemplo, quando um tanque agitado é utilizado como um misturador para que a suspensão seja alimentada homogeneamente em um reator. Entretanto, em muitos casos, é suficiente que todas as partículas sólidas estejam em suspensão, assim toda a superfície do sólido fica em contato com o líquido. Como exemplos têm-se a dissolução de um sólido em um líquido por batelada, ou um reator onde um catalisador sólido é utilizado (ZWIETERING, 1957).

Muitos trabalhos experimentais foram feitos para encontrar correlações para a velocidade mínima de suspensão em diferentes tipos de impelidores. ZWIETERING (1957) foi um dos primeiros a realizar este tipo de trabalho e utilizou um tanque transparente com quatro chicanas. Foram feitas apenas observações visuais, e nenhuma amostra foi retirada do tanque. O fundo foi observado com o auxílio de um espelho e a velocidade mínima de suspensão era considerada quando nenhuma partícula permanecia parada no fundo do tanque por mais de dois segundos. Foram variadas as dimensões do tanque, o tipo, as dimensões e a posição do impelidor, a quantidade, a densidade e o tamanho das partículas de sólido e a viscosidade do líquido. Uma relação adimensional foi encontrada fixando-se a razão diâmetro do tanque/distância do impelidor ao fundo. Esta relação leva em conta o número adimensional  $S$ , que é função da geometria e é diferente para cada tipo de impelidor. Em geral os desvios foram pequenos, raramente maiores do que 10%.

NIENOW (1968) apresentou novos gráficos para determinação da velocidade mínima de suspensão, através da correlação de Zwietering. Foi utilizado um impelidor de seis pás do tipo turbina e um tanque de fundo chato com

quatro chicanas. Entretanto, diferentemente do encontrado por Zwietering, foi estabelecido que a distância do impelidor ao fundo é uma variável extremamente importante quando as interações entre as partículas suspensas e o líquido são consideráveis. Dois padrões de fluxo completamente diferentes foram produzidos, um com uma grande distância do impelidor ao fundo e outro com uma pequena. Estes padrões de escoamento resultaram em uma distribuição de sólidos ao longo do tanque também diferente, e a suspensão foi alcançada mais facilmente com impelidores maiores e menor distância do fundo.

NARAYANAN et al (1968) desenvolveram uma equação para determinação da velocidade mínima de suspensão, baseada no padrão de escoamento, na geometria e nas propriedades físicas do sistema. Os experimentos foram realizados em um tanque cilíndrico de fundo chato, e a altura de líquido foi mantida igual ao diâmetro do tanque. O impelidor utilizado foi do tipo pás retas com oito pás. Foram avaliados dois diâmetros de tanque, três razões diâmetro do tanque/diâmetro do impelidor, para diferentes concentrações e tamanhos de sólidos. A determinação da velocidade mínima de suspensão foi feita visualmente. Para concentrações de sólidos de 2,5% em volume, a discrepância entre o valor experimental e o teórico foi maior. Com o aumento da concentração, esta diferença diminui até praticamente inexistir em concentrações de 10%. Esta discrepância foi explicada por um fator estatístico, e foi eliminada através de um fator de correção, que é função da concentração de sólidos.

BALDI et al (1977) propuseram um novo modelo para explicar o mecanismo de suspensão completa de partículas sólidas em um tanque agitado com fundo chato provido de quatro chicanas. O impelidor utilizado foi do tipo turbina para suspender partículas de areia. Foram testadas diferentes configurações de tanque, variando-se a distância do impelidor ao fundo do tanque e o diâmetro do impelidor. O diâmetro das partículas também foi variado. Foi encontrada uma equação empírica para a velocidade mínima de suspensão, que é fortemente afetada pela distância do impelidor em relação ao fundo, o que foi a principal diferença entre este trabalho e o de Zwietering (1958). Além disto, na equação

encontrada por Zwietering, a razão diâmetro do impelidor/diâmetro do tanque deve ser avaliada experimentalmente, diferentemente deste trabalho.

MUSIL et al (1978) encontraram duas equações para determinação da velocidade mínima de suspensão e as compararam com resultados obtidos experimentalmente. A diferença dos trabalhos anteriores é que o tanque utilizado possui fundo cônico e a determinação da velocidade mínima de suspensão é feita através de medidas de concentração de sólidos. A informação mais sugestiva que foi extraída dos experimentos foi a existência de duas regiões diferentes hidrodinamicamente. Na primeira região, a velocidade mínima de suspensão não varia com distância do impelidor ao fundo. Conforme esta distância aumenta, a dependência passa a ser linear. Portanto, foram encontradas duas equações, uma para cada região.

CHUDACEK (1985) também se baseou no padrão de escoamento para mostrar que a geometria do tanque influencia a suspensão dos sólidos. Em um tanque de fundo chato, formam-se filetes de sólidos não suspensos no centro e na periferia. Estes filetes são persistentes e requerem um aumento considerável na potência para serem suspensos, o que causa uma baixa eficiência de suspensão. A existência de recirculações, abaixo do impelidor e no fundo, próximas da parede, explicam o depósito dos sólidos, pois estas se encontram em velocidade inferior as do restante do tanque. Uma nova geometria foi testada, reproduzindo os filetes formados durante a suspensão dos sólidos, com a colocação de um cone no centro do tanque e de filetes nas laterais. Este tanque mostrou-se uma nova geometria que conseguiu um rendimento melhor, não só para suspender sólidos, mas para qualquer aplicação controlada por recirculações.

WICHTERLE (1988) desenvolveu um modelo para a velocidade mínima de suspensão baseado na comparação da velocidade terminal da partícula com a velocidade do líquido no fundo do tanque. Se a velocidade terminal da partícula é muito maior do que a velocidade do líquido, a partícula continua no fundo do tanque. Se, ao contrário, a velocidade do líquido for muito maior do que a velocidade terminal da partícula, esta é carregada e não permanece no fundo do

tanque. O perfil de velocidades no fundo do tanque pode ser considerado uma camada limite laminar com um gradiente de velocidade característico. Estes gradientes de velocidade foram obtidos em laboratório pelo método de eletrodifusão. Os resultados obtidos mostraram-se satisfatórios quando comparados com dados experimentais encontrados na literatura.

Outro parâmetro importante para a suspensão de sólidos, que pode ser obtido através do conhecimento da interação sólido-líquido, é a velocidade terminal. Uma partícula densa, colocada em um líquido em repouso, irá acelerar-se até alcançar uma velocidade constante, denominada velocidade terminal. Essa velocidade ocorre quando o valor da força peso é igual à soma do empuxo e a força de arraste que atua na partícula (JOAQUIM JUNIOR et al, 2007). Para partículas esféricas, a velocidade terminal é dada por:

$$U_T = \sqrt{\frac{4d_p g (\rho_p - \rho)}{3C_D \rho}} \quad (2.1)$$

Onde:

- |          |                         |
|----------|-------------------------|
| $d_p$    | Diâmetro da partícula;  |
| $g$      | Gravidade;              |
| $\rho_p$ | Densidade da partícula; |
| $C_D$    | Coeficiente de arraste. |

Para uma velocidade terminal inferior a 0,0025 m/s, não há nenhuma sedimentação. Entre 0,0025 e 0,1 m/s, já ocorre uma certa sedimentação e a partir de 0,1 a sedimentação é elevada.

A expressão da velocidade terminal apresentada é baseada na hidrodinâmica de uma única partícula. A presença de outras partículas diminui o valor de  $U_T$ . O atraso na velocidade terminal ocorre por:

- Interações entre as partículas;
- Interação com o fluxo ascendente de líquido criado pelo assentamento das partículas;

- Aumento aparente da densidade e viscosidade da suspensão (PAUL et al, 2004).

## **2.2. Suspensão de sólidos – Trabalhos com CFD**

Os trabalhos de agitação que utilizam a Fluidodinâmica Computacional (CFD) podem seguir várias frentes. Aqui serão mostrados estudos que avaliam a influência da malha, do modelo de turbulência e da função de interpolação em diversos parâmetros, como o padrão de fluxo do líquido e das partículas, a altura da suspensão, a distribuição do tamanho de partículas, a formação de recirculações, etc.

BRUCATO et al (1998) fizeram simulações numéricas de um tanque agitado tentando descobrir qual o melhor método para considerar a influência da rotação do impelidor no fluido. Três métodos foram testados. No primeiro, o impelidor não é explicitamente simulado, mas condições iniciais derivadas de experimentos são impostas ao fluxo externo. No segundo método, o volume do tanque é dividido em duas regiões concêntricas que se sobrepõem, onde a região interna é a do impelidor, e a externa é a das chicanas. A simulação começa na região do impelidor, onde os cálculos se iniciam com as condições iniciais estipuladas. Após um padrão de fluxo ser formado nesta região, estes resultados são utilizados como condição inicial da região externa. No terceiro método, o tanque também é dividido em dois blocos concêntricos, o interno é rotativo (impelidor), e o externo estacionário. Os dois blocos não se sobrepõem e são acoplados pela técnica *sliding grid*. O primeiro método é o que demanda menos tempo computacional, entretanto, depende de bons dados empíricos, o que o torna restritivo. O segundo método, de um modo geral, apresentou resultados mais satisfatórios do que o primeiro. O terceiro método foi o que melhor concordou com os resultados experimentais, apesar de subestimar a energia cinética turbulenta.

MICALE et al (2000) estudaram a distribuição de partículas em um tanque agitado de duas fases. O objetivo foi escolher o modelo que melhor representava o comportamento das partículas. A distribuição da concentração de partículas foi simulada através de CFD, utilizando o modelo de turbulência  $k-\epsilon$ . Foram feitos dois

tipos de modelagem: um mais simples onde a influência do sólido no líquido não era considerada, e o balanço de massa para o sólido era feito através de equações de sedimentação; e um mais avançado, onde as equações de quantidade de movimento foram resolvidas para ambas as fases. Os resultados foram comparados com dados experimentais obtidos em um tanque agitado em escala de laboratório. Ambos os modelos representaram bem os dados experimentais, entretanto, o modelo mais simples é limitado para baixas concentrações de sólidos, até 4% em volume. Para concentrações mais altas, a influência do sólido no líquido deve ser considerada e o modelo mais avançado deve ser utilizado.

MONTANTE et al (2001) compararam resultados experimentais e de simulação em CFD para a distribuição de sólidos em um tanque agitado com quatro impelidores do tipo pás inclinadas a 45°. Suspensões diluídas de esferas de vidro em água, e em líquidos moderadamente viscosos, foram considerados. As simulações foram feitas utilizando o método *sliding grid* acoplado com o modelo Euleriano-Euleriano e o modelo de turbulência k- $\epsilon$ . As concentrações no plano vertical concordaram com os resultados obtidos experimentalmente, não só como um tendência geral, mas também em alturas específicas. A utilização do coeficiente de arrasto exato é muito importante.

SHA et al (2001) mostraram uma aplicação diferente do CFD em tanques bifásicos sólido-líquido. Eles analisaram a distribuição de tamanho de partículas local em um cristalizador. O modelo de turbulência considerado foi o k- $\epsilon$ , e o problema foi estudado tridimensionalmente. A técnica *sliding grid* foi utilizada para simular o fluxo transiente no tanque agitado. O modelo multifásico foi bem sucedido ao simular a distribuição de diferentes tamanhos de partículas. Os resultados mostraram que a intensidade de agitação, a localização da retirada de produto, e o tamanho das partículas são os fatores que mais afetam a classificação.

MICALE et al (2004) simularam a agitação de um sistema sólido-líquido bastante denso. Estes sistemas formam uma camada bem definida de líquido na

parte superior do tanque, que varia linearmente com a intensidade da agitação. Foram feitos experimentos em um tanque transparente com chicanas, onde a altura da suspensão foi medida em diferentes velocidades de agitação, para diferentes sistemas sólido-líquido. Estes sistemas também foram simulados em CFD, utilizando o modelo Euleriano-Euleriano multi fluido em conjunto com o algoritmo *sliding grid*. As simulações reproduziram corretamente o fenômeno de formação da camada límpida de líquido. Sua formação envolve a influência do momento entre as fases líquida e sólida, incluindo também o efeito da gravidade. Outro aspecto das suspensões densas, como interações partícula-partícula e concentração de sólidos, tiveram efeito secundário no arrasto das partículas. O acoplamento entre as fases líquida e sólida desempenhou grande contribuição para a diminuição da velocidade axial do líquido.

OCHIENG e LEWIS (2006) investigaram a velocidade mínima de suspensão de sólidos e a altura da suspensão em um tanque agitado. Foram feitos estudos experimentais utilizando métodos ópticos e o velocímetro laser-doppler (LDV) para investigar estes fenômenos. Nos estudos computacionais em CFD, foram testados os modelos de turbulência *shear stress transport* (SST) e  $k-\varepsilon$ . O modelo SST apresentou melhor comportamento nas regiões próximas à parede, entretanto, no seio do fluido ambos tiveram o mesmo resultado, sendo que em alguns casos o  $k-\varepsilon$  se comportou melhor. Portanto, todos os estudos foram conduzidos com o  $k-\varepsilon$ . Foram feitas também análises no estado estacionário e no transiente, sendo que o transiente com as partículas começando no fundo do tanque, se aproximou mais dos dados experimentais. Os melhores resultados foram obtidos para partículas pequenas ( $150\mu\text{m}$ ) em pequenas concentrações.

DEGLON e MEYER (2006) estudaram a influência das funções de interpolação e da malha no número de potência, componentes de velocidade e energia cinética turbulenta de um tanque agitado. O modelo de turbulência utilizado foi o  $k-\varepsilon$ , e o modelo de rotação do impelidor, o *Multiple Reference Frame*. Neste modelo de rotação, os cálculos são feitos no regime permanente, com um quadro de referência rotativo na região do impelidor, e um quadro de referência

estático na região fora do domínio do impelidor. Os resultados foram comparados com trabalhos experimentais publicados anteriormente. As simulações foram feitas com quatro níveis de refinamento de malha e com as funções de interpolação *upwind*, diferenças centrais e QUICK. Os resultados mostraram que, para prever o fluxo e a velocidade média do fluido, as funções de interpolação e o refinamento da malha não tiveram grande influência; entretanto, a energia cinética turbulenta e o número de potência são altamente afetados por ambos. Neste trabalho foi necessária uma malha com 2 milhões volumes de controle, para meio tanque de 15 cm de diâmetro, combinado com a função de interpolação QUICK, para alcançar resultados satisfatórios. Entretanto, o modelo  $k-\varepsilon$  não prevê corretamente a turbulência.

MURTHY e JOSHI (2008) compararam modelos de turbulência em diferentes tipos de impelidor. Os resultados foram comparados com dados experimentais obtidos com laser-doppler. Os modelos de turbulência estudados foram o  $k-\varepsilon$ , o *Reynolds Stress Transport Model* (RSTM) e o *Large Eddy Simulations* (LES). O padrão de fluxo foi melhor representado pelo RSTM do que pelo  $k-\varepsilon$ , principalmente em situações onde existem recirculações, pois o  $k-\varepsilon$  superestima os turbilhões. Tanto o RSTM quanto o  $k-\varepsilon$  falharam em prever a energia cinética turbulenta na região próxima ao impelidor. O modelo LES foi o que apresentou resultados mais consistentes com as medidas experimentais, pois conseguiu prever a formação de vórtices.

KASAT et al (2008) estudaram a suspensão de sólidos e sua interferência na fase líquida no processo de mistura. O fluxo turbulento foi simulado utilizando-se o modelo de duas equações  $k-\varepsilon$ . A distribuição de concentração de sólidos foi comparada com resultados experimentais. O modelo computacional foi então estendido para simular e entender as implicações da qualidade de suspensão no processo de mistura da fase líquida. Eles concluíram que o atraso na mistura que ocorre no topo do tanque, na parte límpida, é responsável pelo aumento no tempo de mistura. Nesta parte límpida, as velocidades do líquido são muito baixas, sendo responsáveis pelo atraso na mistura.

### 3. MODELAGEM MATEMÁTICA E MÉTODOS NUMÉRICOS

Neste capítulo serão mostrados o modelo de CFD e as ferramentas numéricas utilizadas.

#### 3.1. Modelagem Matemática

O problema foi resolvido para um tanque com água e para um com água e areia. O acoplamento entre os domínios do impelidor e do tanque foi feito através do modelo *frozen rotor*. Foi adotado o regime transiente e os fluidos foram considerados incompressíveis. Nos problemas bifásicos foi utilizada a abordagem euleriana- euleriana.

A seguir serão descritos detalhadamente as equações governantes, o modelo de turbulência, e os modelos utilizados pelo software para simular a rotação do impelidor.

##### 3.1.1. Equações de Conservação

É um conjunto de equações diferenciais que compreendem as equações de conservação de massa e de quantidade de movimento.

A Equação (3.1) é a equação de conservação de massa.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (3.1)$$

Para uma dada fase  $\alpha$ , a equação torna-se:

$$\frac{\partial}{\partial t} (r_\alpha \rho_\alpha + \nabla \cdot (r_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha)) = S_{MS\alpha} + \sum_{\beta=1}^{N_p} \Gamma_{\alpha\beta} \quad (3.2)$$

Onde,

- t                    tempo;
- $r_\alpha$                 Fração volumétrica da fase  $\alpha$ ;
- U                    Velocidade (módulo);

$\vec{U}_\alpha$	Vetor velocidade da fase $\alpha$ ;
$\rho$	Densidade;
$\rho_\alpha$	Densidade da fase $\alpha$ ;
$S_{MS\alpha}$	Representa possíveis fontes de massa da fase $\alpha$ ;
$\Gamma_{\alpha\beta}$	Fluxo mássico por unidade de volume da fase $\beta$ para fase $\alpha$ .

O termo  $\Gamma_{\alpha\beta}$  só se faz presente quando existe transferência de massa entre as fases. Portanto, no caso deste trabalho, este termo é nulo.

A Equação (3.3) é a equação da conservação da quantidade de movimento (Navier-Stokes).

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \left( \mu \left( \nabla U + (\nabla U)^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot U \right) \right) + S_m \quad (3.3)$$

A equação de conservação de quantidade de movimento para uma fase  $\alpha$  torna-se:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (r_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha) + \nabla \cdot (r_\alpha (\rho_\alpha \vec{U}_\alpha \otimes \vec{U}_\alpha)) &= -r_\alpha \nabla p_\alpha + \nabla \cdot \left( r_\alpha \mu_\alpha \left( \nabla \vec{U}_\alpha + (\nabla \vec{U}_\alpha)^T \right) \right) \\ + S_{M\alpha} + M_\alpha & \end{aligned} \quad (3.4)$$

Onde,

$p$	Pressão estática;
$P_\alpha$	Pressão na fase $\alpha$ ;
$\vec{U}_\beta$	Vetor velocidade da fase $\beta$ ;
$\mu_\alpha$	Viscosidade da fase $\alpha$ ;
$\delta$	Matriz identidade;

$S_m$  Representa fontes de quantidade de movimento na fase  $\alpha$  devido a forças externas;

$S_{M\alpha}$  Representa fontes de quantidade de movimento na fase  $\alpha$  devido a forças externas;

$M_\alpha$  Força total imposta à fase  $\alpha$  devido à interação com as outras fases e é dada através da Equação (3.5):

$$M_\alpha = \sum_{\beta \neq \alpha} M_{\alpha\beta} \quad (3.5)$$

Como as forças entre um par de fases são da mesma magnitude e de direções opostas, o somatório de todas as fases se anula, como mostrado na Equação (3.6):

$$M_{\alpha\beta} = -M_{\beta\alpha} \Rightarrow \sum_{\alpha} M_\alpha = 0 \quad (3.6)$$

O termo de troca de momento entre fases consiste de quatro forças diferentes: a força de sustentação, força de Basset, força de massa virtual e força de arraste (RANADE, 1992). A força de Basset aparece devido ao desenvolvimento da camada limite em torno das partículas e sua magnitude é muito menor do que a força de arraste, não sendo, portanto, considerada. A influência de outras forças inter-fases, como a força de sustentação e a força de massa virtual foram estudadas por LJUNGQVIST e RASMUSON (2001). Eles encontraram uma influência muito pequena destas forças no perfil de sólidos. Considerando isto, no presente trabalho, as forças de Basset, de sustentação e de massa virtual não serão consideradas.

$$M_{\alpha\beta} = M_{\alpha\beta}^D \quad (3.7)$$

Para escoamentos em sistemas de referência rotativos, se faz necessária a adição de termos fontes de quantidade de movimento referentes às forças de Coriolis e centrífuga:

$$S_{M,rot} = S_{Cor} + S_{cfg} \quad (3.8)$$

$$S_{Cor} = -2\rho\omega \times U \quad (3.9)$$

$$S_{cfg} = -\rho\omega \times (\omega \times r) \quad (3.10)$$

Onde:

$\omega$  Velocidade angular

$r$  Vetor de localização

### 3.1.2. Força de Arraste

A equação que representa a força de arraste presente na suspensão de sólidos tem seu módulo diretamente proporcional à diferença de velocidade entre as fases, como mostra a Equação 3.11.

$$M_{\alpha\beta}^D = C_{\alpha\beta}^{(d)} (\vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha) \quad (3.11)$$

As partículas de areia serão consideradas esféricas e, neste caso, os coeficientes  $C_{\alpha\beta}^{(d)}$  podem ser derivados analiticamente. A área de uma partícula projetada na direção do fluxo, e o volume de uma partícula são dados por:

$$A_p = \frac{\pi d_p^2}{4} \quad (3.12)$$

$$V_p = \frac{\pi d_p^3}{6} \quad (3.13)$$

Onde:

$A_p$  Área de uma partícula projetada no fluxo;

$V_p$  Volume de uma partícula.

O número de partículas por unidade de volume,  $n_p$  é dado pela Equação (3.14):

$$n_p = \frac{r_\beta}{V_p} = \frac{6r_\beta}{\pi d_p^3} \quad (3.14)$$

O arraste exercido por uma única partícula na fase contínua é dado por:

$$D_p = \frac{1}{2} C_D \rho_\alpha A_p \left| \vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha \right| \left( \vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha \right) \quad (3.15)$$

Portanto, o arraste total por unidade de volume na fase contínua é:

$$D_{\alpha\beta} = n_p D_p = \frac{3}{4} \frac{C_D}{d_p} r_\alpha \rho_\alpha \left| \vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha \right| \left( \vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha \right) \quad (3.16)$$

Comparando com as equações de momento para fase  $\alpha$ , onde a força de arraste por unidade de volume é dada por:

$$D_{\alpha\beta} = C_{\alpha\beta}^{(d)} (\vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha) \quad (3.17)$$

Temos:

$$C_{\alpha\beta}^{(d)} = \frac{3}{4} \frac{C_D}{d_p} r_\beta \rho_\alpha \left| \vec{U}_\beta - \vec{U}_\beta \right| \quad (3.18)$$

Que pode ser escrito como:

$$C_{\alpha\beta}^{(d)} = \frac{C_D}{8} A_{\alpha\beta} \rho_\alpha \left| \vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha \right| \quad (3.19)$$

Onde:

$A_{\alpha\beta}$  Área superficial por unidade de volume.

Esta é a forma utilizada pelo ANSYS/CFX 12<sup>tm</sup>. Existem também correlações específicas para o arraste em fluxos multifásicos dispersos.

A correlação escolhida para o coeficiente de arraste foi a de Gidaspow, que utiliza a correlação de Wen Yu para baixas frações volumétricas de sólidos,  $r_d < 0,2$ , e a Lei de Ergun em um meio poroso com grandes frações volumétricas de sólidos, conforme as Equações 3.20 à 3.22.

$$C_D = r_c^{-1,65} \max \left( \frac{24}{Re'} (1 + 0,15 Re'^{0,687}); 0,44 \right) \quad (\text{Wen Yu}), r_c > 0,8 \quad (3.20)$$

$$Re' = r_c Re \quad (3.21)$$

$$C_{\alpha\beta}^{(d)} = \frac{150(1-r_c)^2 \mu_c}{r_c d_p^2} + \frac{7(1-r_c)\rho_c |U_c - U_d|}{4 d_p}, r_c < 0,8 \quad (3.22)$$

Onde:

$r_c$  Fração volumétrica da fase contínua;

$\mu_c$  Viscosidade da fase contínua;

$U_c$  Velocidade da fase contínua;

$U_d$  Velocidade da fase descontínua;

$\rho_c$  Densidade da fase contínua.

De modo a evitar dificuldades numéricas, o software ANSYS CFX modificou o modelo original de Gidaspow interpolando linearmente entre as correlações de Wen Yu e Ergun, no intervalo de  $0,7 < r_c < 0,8$  (manual CFX 12.0<sup>tm</sup>).

### 3.1.3. Modelo de turbulência SST (*Shear Stress Transport*)

Para a aplicação de suspensão de sólidos, o escoamento dentro de um tanque de mistura geralmente é turbulento.

A turbulência não tem uma definição formal, porém, um escoamento turbulento tem uma série de características em comum, citadas por TENNEKES e LUMLEY (1972):

- Estes escoamentos são irregulares, aleatórios e caóticos, consistindo de escalas de turbilhões, onde os maiores são da escala da geometria do fluxo e os menores são dissipados pelas forças viscosas em energia interna.

- A difusividade em fluxos turbulentos aumenta, assim como também há um acréscimo na transferência de quantidade de movimento.

- Possuem altos números de Reynolds.

- São sempre tridimensionais. Entretanto, quando são feitas médias das propriedades nas equações, o fluxo pode ser tratado como bidimensional.

- São dissipativos, isto é, a energia é transmitida a partir das escalas maiores para as escalas menores de turbilhões até ser transformada em energia interna.

- Apesar de haver escalas turbulentas bastante pequenas, elas são muito maiores do que as escalas moleculares possibilitando o tratamento das variáveis como contínuas.

Quando o efeito da turbulência é incluído nas equações de Navier-Stokes, as quantidades transportadas são descritas como a soma de um valor médio e um valor de equilíbrio. Após integrar na média para um tempo muito maior que as flutuações turbulentas, a soma das flutuações será zero e sobrarão os valores médios. Estes termos são os tensores de Reynolds, e são aproximados pelos modelos de turbulência.

O modelo de turbulência escolhido para este trabalho foi o *shear stress transport* (SST), pois permite uma predição mais exata e robusta em problemas com separação de camada limite. O modelo SST foi criado por Menter (MENTER, 1994) e é um modelo híbrido, que combina as vantagens dos modelos  $k-\omega$  e  $k-\varepsilon$ .

O modelo  $k-\omega$  apresenta boa capacidade em simular o descolamento da camada limite, porém sua aplicação é limitada a números de Reynolds não muito altos. O modelo  $k-\varepsilon$  é um dos mais populares, apresenta grande precisão nas regiões fora da camada limite, além disso pode ser utilizado com altos números de Reynolds. No modelo SST, o modelo  $k-\omega$  é utilizado nas regiões próximas às paredes, onde as velocidades são mais baixas, e o  $k-\varepsilon$  nas restantes. Para que esta troca lógica de modelos funcione, o modelo  $k-\varepsilon$  é multiplicado por uma função de combinação e adicionado ao modelo  $k-\omega$  também multiplicado por uma função de combinação. Então, impõe-se que a função tenha valor unitário no interior da camada limite e, gradativamente, torne-se nula fora da mesma (NOLETO, 2006).

As Equações 3.23 e 3.24 são as equações de transporte do modelo SST:

$$\rho \left( \frac{\partial k}{\partial t} + \bar{U}_i \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) = P_k - \beta^* \rho k \Omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (3.23)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \Omega}{\partial t} + \vec{U}_i \frac{\partial \Omega}{\partial x_i} \right) = \alpha \rho S^2 + \beta \rho \Omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \Omega}{\partial x_i} \right] + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} + \frac{1}{\Omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \Omega}{\partial x_i} \quad (3.24)$$

Onde:

k	Energia cinética turbulenta;”
$\vec{U}_i$	Vetor velocidade na direção i;
$x_i$	coordenada cartesiana;
$P_k$	Limitador de produção;
$\beta^*$	Constante=0,09;
$\Omega$	Freqüência turbulenta;
$\mu_t$	Viscosidade dinâmica turbulenta;
$\alpha$	Constante do modelo SST;
$\beta$	Constante=0,0750;
$\sigma_k$	Constante=1,0;
S	Taxa de deformação;
$\sigma_\omega$	Constante=0,5
$F_1$	Função de combinação;
$\sigma_{\omega 2}$	Constante=0,856.

A definição da viscosidade turbulenta é feita de modo a contabilizar o transporte das tensões cisalhantes principais turbulentas:

$$v_t = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \Omega, (S_{ij} S_{ij})^{1/2} F_2)} \quad (3.25)$$

Onde:

$\nu_t$	Viscosidade turbulenta;
$\alpha_1$	Constante=5/9;
$F_2$	Função de combinação.

O termo  $(S_{ij}S_{ij})^{1/2}$  é uma medida invariante do tensor taxa de deformação  $S(U)$ . A formulação das funções de mistura  $F_1$  e  $F_2$  é baseada na distância até a parede e nas variáveis do escoamento.

As funções de combinação têm como característica a delimitação das zonas onde cada modelo irá atuar. Através dos valores encontrados para as funções, o modelo irá mudar a formulação nas equações de transporte. A primeira função de combinação ( $F_1$ ) é responsável pela troca de modelos na segunda equação de dissipação do modelo. Esta função de combinação também é responsável pela determinação das constantes do modelo. A segunda função ( $F_2$ ) é responsável pela troca de modelos na formulação da viscosidade turbulenta. Estas funções são dadas por:

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4) \quad (3.26)$$

$$\arg_1 = \min \left[ \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega'}, \frac{500\nu}{y^2 \Omega} \right), \frac{4\rho\sigma_{\omega_2} k}{CD_{\kappa\omega} y^2} \right] \quad (3.27)$$

Em que:

$\omega'$	Vorticidade absoluta;
$y$	Distância até a parede;
$\nu$	Viscosidade cinemática;
$\sigma_{\omega_2}$	Constante=0,856.

$CD_{\kappa\omega}$  é a porção positiva do termo de difusão cruzada, dado por:

$$CD_{\kappa\omega} = \max\left(2\rho\sigma_{\omega_2} \frac{1}{\Omega} \nabla k \nabla \Omega, 1, 0.10^{-10}\right) \quad (3.28)$$

$F_1$  é igual a zero na região afastada da parede (modelo k- $\varepsilon$ ) e muda para 1 no interior da camada limite, na região perto da parede (modelo k- $\omega$ ). A função  $F_2$  é denotada por:

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (3.29)$$

$$\arg_2 = \max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^*\Omega y}, \frac{500\nu}{y^2\Omega}\right) \quad (3.30)$$

Um limitador de produção é utilizado para evitar o crescimento de turbulência em regiões de estagnação:

$$P_\kappa = \mu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.31)$$

$$\tilde{P}_\kappa = \max(P_\kappa, 10 \cdot \rho \beta^* k \Omega) \quad (3.32)$$

Se  $\alpha_1$  representa qualquer constante do modelo k- $\omega$  e  $\alpha_2$  representa qualquer constante do modelo k- $\varepsilon$ , então  $\alpha$ , que é a constante correspondente no modelo SST é computada como uma síntese dos dois primeiros modelos através da seguinte função:

$$\alpha = \alpha_1 F_1 + \alpha_2 (1 - F_1) \quad (3.33)$$

As expressões analíticas para  $\omega$  fornecidas por suas equações de transporte permitem uma formulação próxima à parede. Esta formulação muda gradualmente de leis de parede para formulações de baixo número de Reynolds próximo à parede.

### 3.1.4. Modelo *Alternate Rotation Model*

Este é um modelo que modifica os termos de advecção nas equações de momento. A velocidade utilizada é a do sistema de referência estacionário,  $U_{abs}$ , ao invés da velocidade no sistema rotativo,  $U$ . Esta troca de variáveis requer uma modificação no termo fonte, referente às forças de Coriolis. A forma final da equação de conservação de quantidade de movimento fica:

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U_{abs}) = -\nabla \cdot \left( -p\delta + \mu \left( \nabla U + (\nabla U)^T \right) \right) - 2\rho\omega \times U - p\omega \times (\omega \times r) \quad (3.34)$$

A grande vantagem deste modelo é observada quando a velocidade absoluta no sistema de referência é constante, mas a velocidade no sistema de referência rotativo tem alta formação de recirculações. Neste caso, a velocidade de referência rotativa tem um alto erro associado, enquanto a velocidade do sistema constante tem muito menos erro.

O modelo fornece uma grande redução no erro numérico quando o escoamento é constante e paralelo ao eixo de rotação. Por exemplo, o fluxo próximo ao impelidor é um fluxo constante e paralelo ao eixo de rotação.

Quando este modelo não é utilizado, erros pequenos no sistema de referência rotativo tornam-se grandes em localidades afastadas do eixo de rotação (Manual CFX 12.0™).

### 3.1.5. Modelo *Frozen Rotor*

Neste modelo, os sistemas de referência rotativo e estacionário são modelados com uma referência fixa, e são ligados por uma superfície deslizante (*sliding grid*).

Esta abordagem prediz o escoamento em regime permanente de um sistema rotor/estator, onde o escoamento no rotor é resolvido em um sistema de referência estacionário, e o escoamento no estator é resolvido em um sistema de referência rotacional.

A vantagem desta abordagem é que a solução no sistema estacionário é obtida para múltiplos sistemas de referências, levando em conta a interação entre os blocos estáticos e rotacionais. Além disso, o modelo é robusto e precisa de menos recursos computacionais quando comparado a outros modelos de múltipla referência (Manual CFX 12.0™).

## **3.2. Métodos Numéricos**

Neste tópico, serão apresentados o método dos volumes finitos, o procedimento computacional, e as condições de contorno das simulações.

### **3.2.1. Método dos Volumes Finitos**

Um método numérico deve resolver uma ou mais equações diferenciais, substituindo as derivadas existentes por expressões algébricas que envolvem a função incógnita. Quando não é possível a solução analítica, temos que fazer uma aproximação numérica da equação diferencial.

A aproximação discreta de uma equação de conservação pelo método dos volumes finitos tem por objetivo dividir o domínio de cálculo em certo número de subdomínios, nos quais a lei física de conservação seja feita válida, dentro de certo grau de aproximação. Esta aproximação pode ser obtida de duas formas. A primeira forma é a utilização do balanço da propriedade conservada para cada um dos subdomínios. O segundo modo é a integração da equação de conservação, na forma conservativa, no volume do subdomínio. Ambos os métodos levam ao mesmo resultado, pois a equação de conservação se originou através de um balanço da propriedade em um volume finito.

### **3.2.2. Procedimento Computacional**

A seguinte seqüência de procedimentos foi adotada para obtenção dos resultados:

- Geração da geometria no software ANSYS Workbench/Design Modeler<sup>tm</sup>;
- Discretização do domínio de solução do problema, através da construção da malha numérica no software comercial ANSYS/CFX-mesh<sup>tm</sup>;
- Etapa de pré-processamento, com aplicação das condições de contorno;
- Resolução do sistema de equações;
- Pós-processamento, para o tratamento e visualização dos resultados obtidos.

As etapas de pré-processamento, resolução e pós-processamento foram feitas com o software comercial ANSYS/CFX 12.0<sup>tm</sup>.

**Pré-processamento:** onde o problema é caracterizado e modelado. Esta etapa envolve:

- definição da geometria e regiões de interesse (domínio computacional);
- geração da malha numérica que contém subdivisões do domínio computacional.
- seleção dos fenômenos físicos e químicos;
- definição das propriedades dos fluidos envolvidos no problema;
- especificação das condições de contorno.

**Resolução das equações (Solver):** os métodos numéricos resolvem o problema em três etapas:

- aproximação das variáveis do problema em funções simples;
- discretização das aproximações que governam o problema;
- solução algébrica das equações.

**Pós-processamento:** permite a visualização dos resultados através de diferentes posições em relação a geometria. Os gráficos e mapas que podem ser construídos incluem:

- geometrias do domínio computacional;
- plotagens vetoriais de linhas de contorno e de superfícies 2-D e 3-D;
- manipulações gráficas, com rotação e translação;
- animações dinâmicas dos resultados.

Para execução das simulações, foi utilizado um cluster com 32GB de memória RAM, 8 núcleos (2 processadores quadcore) e 2.93GHz, sendo que o tempo médio para a obtenção das soluções foi de um dia para os tanques com água, e 15 dias para a suspensão de areia.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão mostrados os resultados obtidos com a simulação e experimentalmente.

### 4.1. *Ensaio no tanque piloto*

Foram realizados ensaios experimentais para validar as simulações realizadas em CFD. A validação foi feita comparando-se os resultados experimentais e de simulações da curva do número de potência em função do número de Reynolds.

#### 4.1.1. Materiais e métodos

Os experimentos foram feitos com água a 25°C em um tanque piloto cilíndrico com as seguintes características:

- Fundo torisférico 10%;
- Tanque de acrílico;
- Conjunto de 3 chicanas removíveis;
- Motor elétrico SEW de 1,5 kW;
- Painel de controle;
- Torquímetro digital MAGTROL.

A escolha por três chicanas foi feita para que, durante as simulações, pudesse ser utilizada a condição de simetria no tanque. O recomendado é que se utilizem quatro chicanas em impelidores de três pás, para evitar vibrações mecânicas. Neste trabalho, no entanto, este parâmetro não afetará os resultados.

As propriedades da água estão mostradas na Tabela 4.1:

**Tabela 4.1.** Propriedades da água.

Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	980
Viscosidade (cP)	1
Temperatura (°C)	25

As dimensões características de um tanque de mistura são: diâmetro interno do tanque (T), diâmetro do impelidor (D), altura de líquido (H), distância do impelidor ao fundo do tanque (C), e largura das chicanas (b). As relações geométricas em um tanque de mistura variam muito com o tipo de aplicação, entretanto, algumas relações são normalmente praticadas. Elas foram utilizadas neste trabalho e são:  $D/T=1/3$ ,  $C/T=1/3$ ,  $b/T=1/12$  (JOAQUIM JUNIOR et al, 2007). As dimensões do tanque de mistura, do impelidor e das chicanas são apresentadas na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2.** Dimensões do tanque de mistura utilizado no experimento.

Diâmetro do tanque	T= 380 mm
Altura de líquido	H=T= 380 mm
Distância do impelidor ao fundo	C= 126,63 mm
Diâmetro do impelidor	D= 127 mm
Largura das chicanas	b= 30 mm

O software MAGTROL – *Motor Testing Software* foi utilizado para a aquisição dos dados de torque e potência, variando a velocidade de rotação de 30 rpm até 2500 rpm.

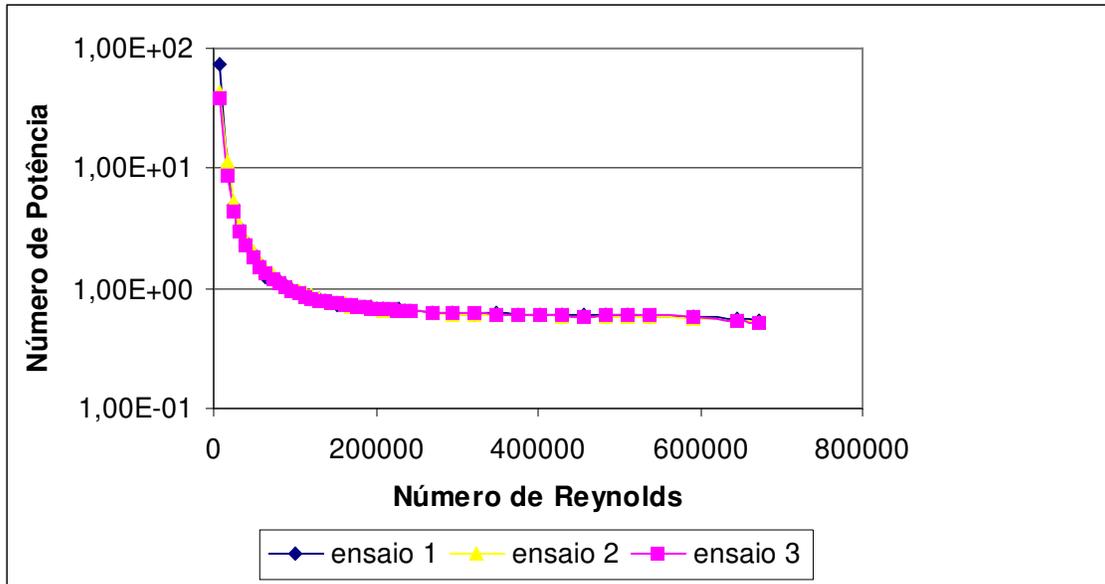
A Figura 4.1 mostra o sistema piloto utilizado.



**Figura 4.1.** Tanque piloto utilizado nos ensaios.

#### **4.1.2. Resultados Experimentais**

O ensaio foi feito em triplicata de forma a testar a confiabilidade do sistema de medição. Os resultados obtidos nos três ensaios são mostrados na Figura 4.2.



**Figura 4.2.** Curvas de potência para o impelidor KPC em tanque com três chicanas, para os três ensaios realizados.

O desvio padrão médio alcançado nos ensaios foi de 0,034, o que comprova a regularidade dos resultados obtidos.

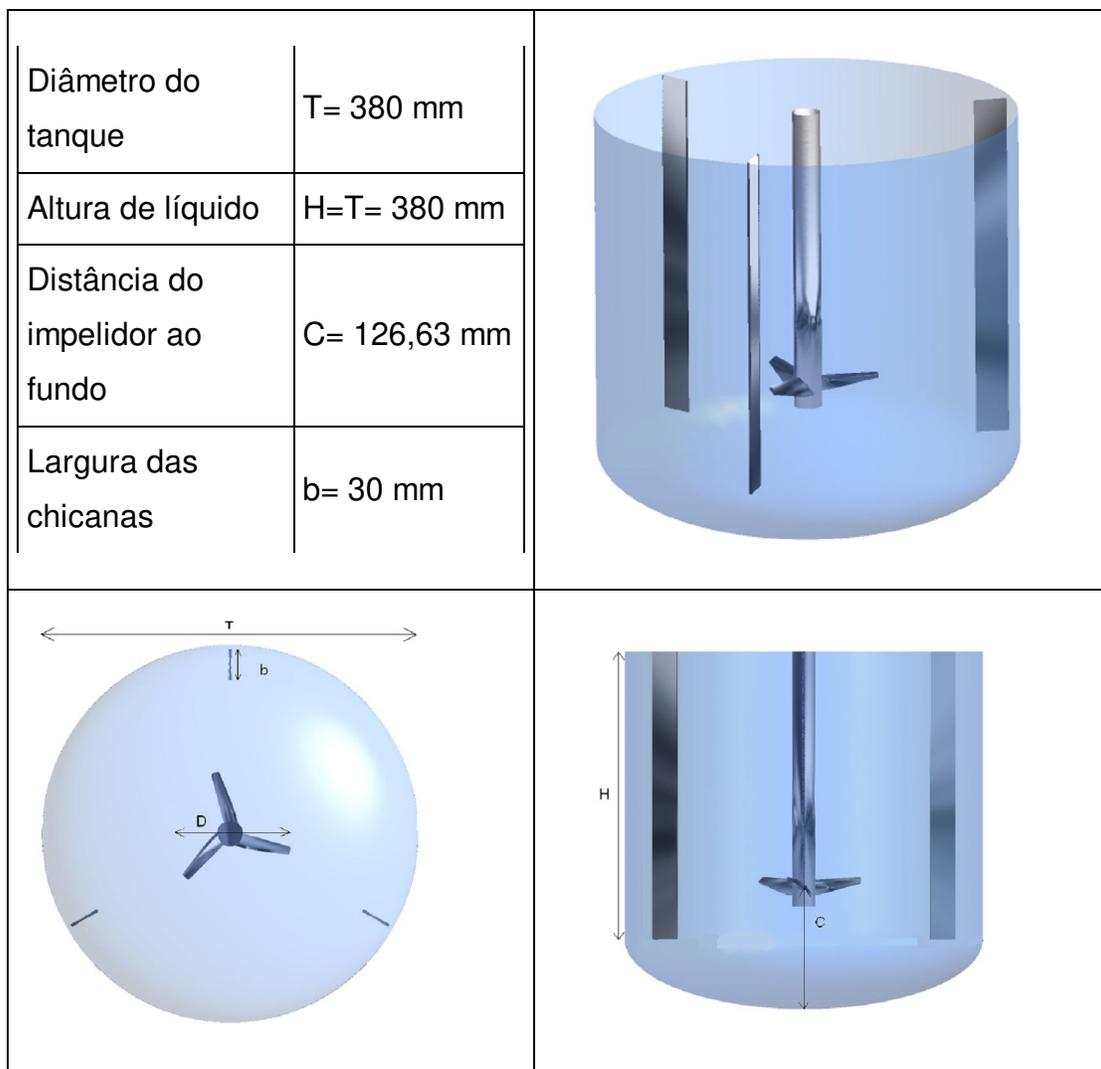
## 4.2. Simulações

As simulações do tanque agitado com o impelidor KPC tiveram três objetivos:

- Obter dados de potência consumida pelo impelidor, para comparar com os dados obtidos experimentalmente;
- Variar os ângulos da pá do impelidor para otimizá-lo;
- Comparar o desempenho do impelidor original com o otimizado em uma suspensão de sólidos.

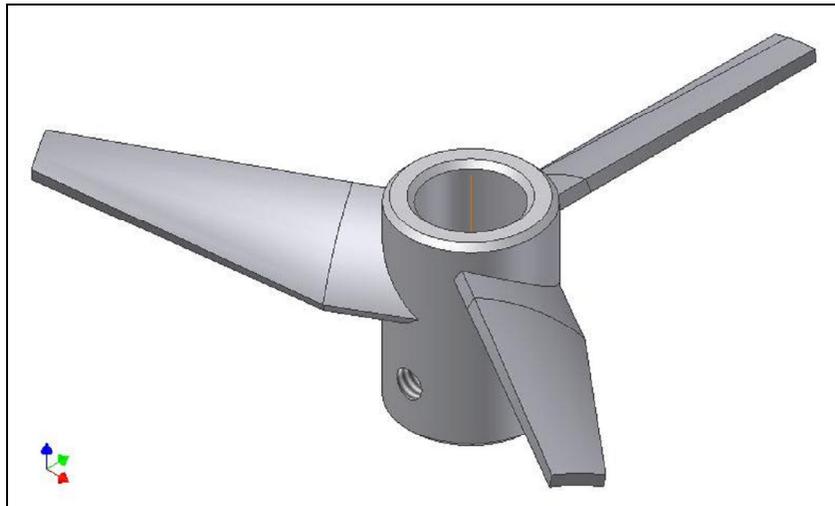
Para atingir os dois primeiros objetivos, as simulações foram feitas apenas com água, sem partículas sólidas. Para o terceiro objetivo, adicionou-se areia na concentração de 40% em volume em todo domínio.

Em todas as situações foram simuladas a mesma geometria do tanque que foi utilizado experimentalmente, ou seja, um tanque cilíndrico, com fundo torisférico 10%, cujos dados são apresentados na Figura 4.3.



**Figura 4.3.** Configuração do tanque agitado.

A Figura 4.4 mostra o impelidor KPC original utilizado nas simulações, com  $45^\circ$  na raiz e na ponta das pás.



**Figura 4.4.** Impelidor KPC.

Para todos os casos, inicialmente as simulações foram feitas em regime estacionário, que foram utilizadas como condição inicial para o regime transiente. Utilizou-se a condição de simetria para diminuir o esforço computacional, calculando 1/3 do tanque. Foram estabelecidos dois domínios: um rotativo para o impelidor, e um estático para o tanque.

#### **4.2.1. Geração da malha**

Malha é um conjunto de volumes de controle, todos conectados entre si, onde em cada um deles as propriedades são constantes. Ou seja, é o processo de discretização utilizado pelo Método dos Volumes Finitos. A malha gerada foi utilizada para as três diferentes situações.

A geração da malha utilizada neste trabalho foi feita no *software* ANSYS Workbench/CFX-mesh<sup>tm</sup>. Devido à complexidade da geometria do impelidor KPC e ao grande número de geometrias geradas, a malha escolhida foi a tetraédrica, que tem a vantagem de ser flexível e se adaptar bem a qualquer geometria. Quando feita corretamente, os resultados são semelhantes às malhas hexaédricas. Entretanto, alguns cuidados devem ser tomados para que a malha gere resultados satisfatórios e represente com exatidão o problema.

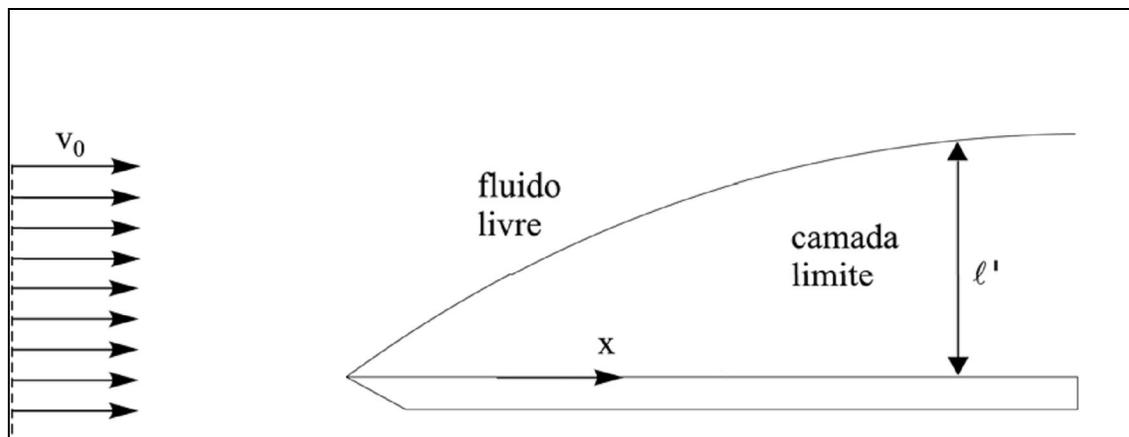
Na região de interface entre os domínios do tanque e do impelidor, a malha foi refinada para que as informações entre um domínio e outro fossem passadas de maneira correta.

Nas regiões próximas à parede do tanque e das pás, foi gerada uma camada de prismas. Uma maior atenção foi dedicada às pás, onde ocorre o descolamento da camada limite.

Em escoamentos externos, observa-se gradientes acentuados de velocidade, somente em uma região muito próxima às superfícies sólidas, chamada de região da camada limite.

Quando as partículas do fluido entram em contato com a superfície, elas têm velocidade nula. Estas partículas atuam no retardamento do movimento das partículas da camada de fluido adjacente, que por sua vez atuam na seguinte e assim até uma distância da superfície  $y = \ell'$  onde o efeito do retardamento é desprezível. Este retardamento do movimento está associado às tensões de cisalhamento que atuam em planos paralelos à velocidade do fluido. Com o aumento da distância  $y$  da superfície, o componente da velocidade do fluido na direção  $x$  deve aumentar até atingir o valor na corrente livre  $v_0$ .

Portanto, a camada limite é o lugar geométrico que separa a região do fluido perturbada pela presença do corpo sólido, da região que não sofre nenhuma influência da sua presença. Na região da camada limite a velocidade varia de zero a 99% de  $v_0$ , conforme a Figura 4.5.



**Figura 4.5.** Espessura da camada limite (BRUNETTI, 2004).

Devido a esta grande variação da velocidade nas regiões próximas às paredes, e ao modelo de turbulência utilizado (SST), a camada de prismas é muito importante para prever corretamente a turbulência e o descolamento da camada limite.

Um parâmetro utilizado para a determinação da espessura da camada de prismas é a variável adimensional  $y^+$ , que é uma medida adimensional da distância da parede, definida por:

$$y^+ = \frac{\sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \cdot \Delta n}{\nu} \quad (4.1)$$

Onde:

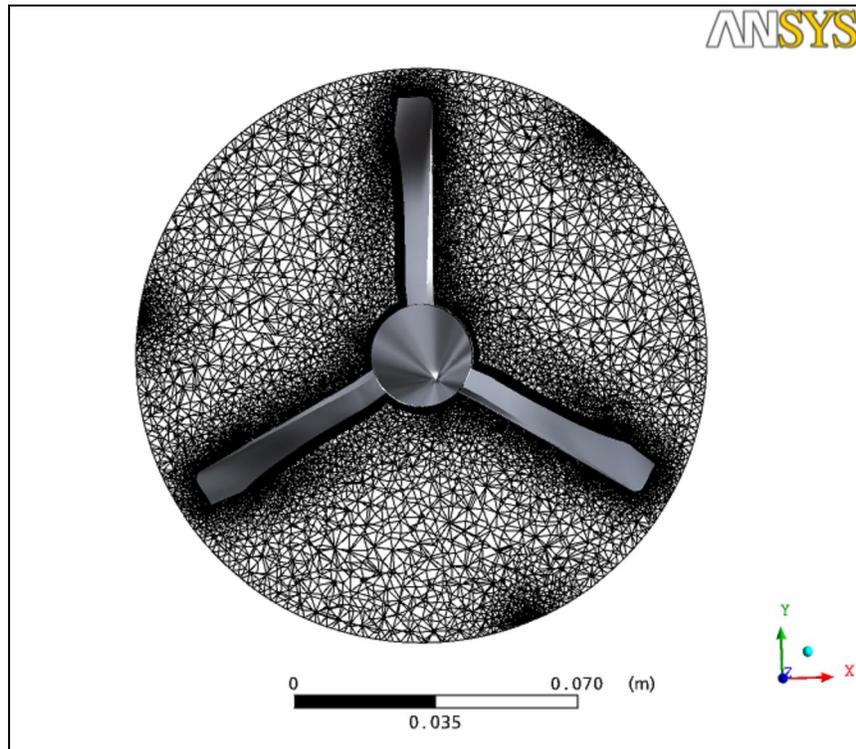
$\tau_w$  é a tensão de cisalhamento na parede;

$\Delta n$  é a distância entre o primeiro e o segundo nó da malha da parede.

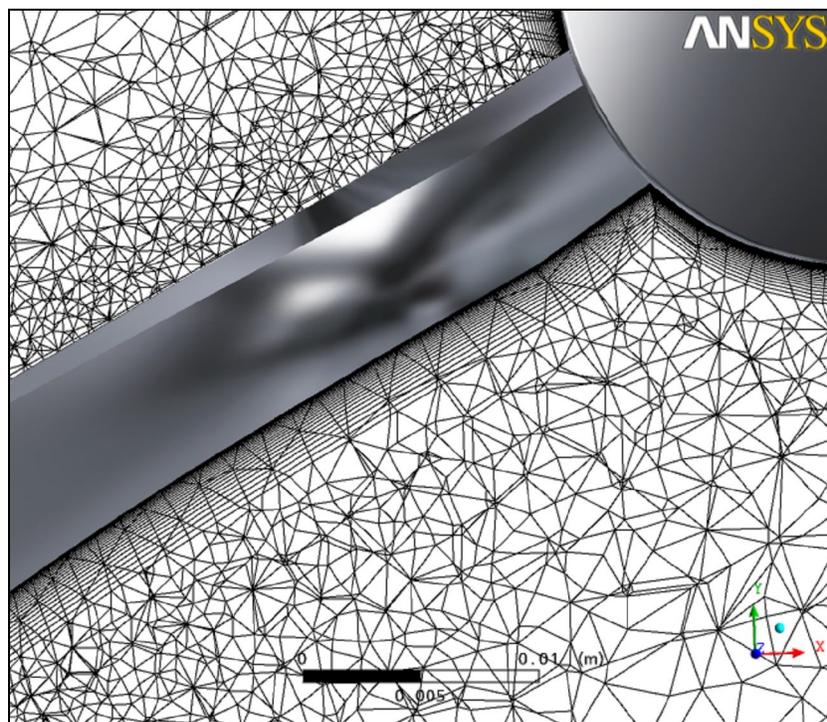
Estudos de sensibilidade do valor de  $y^+$  em impelidores, mostraram que não há quase nenhum efeito na solução final para valores entre 0,001 e 1. Para valores de  $y^+$  maiores do que 10, a localização do descolamento da camada limite move-se para cima (SPOGIS e NUNHEZ, 2009). A configuração final da camada de prismas na pá foi feita de modo que o valor do  $y^+$  atinja o valor máximo de 10, e levou em consideração os seguintes critérios:

- distância da parede ao primeiro nó: 0,03 mm;
- taxa de crescimento dos nós: 10%;
- número de elementos na camada de prismas: 20.

As Figuras 4.6 e 4.7 mostram o plano horizontal da malha gerada no domínio do impelidor e o detalhe da camada de prismas na pá, respectivamente.

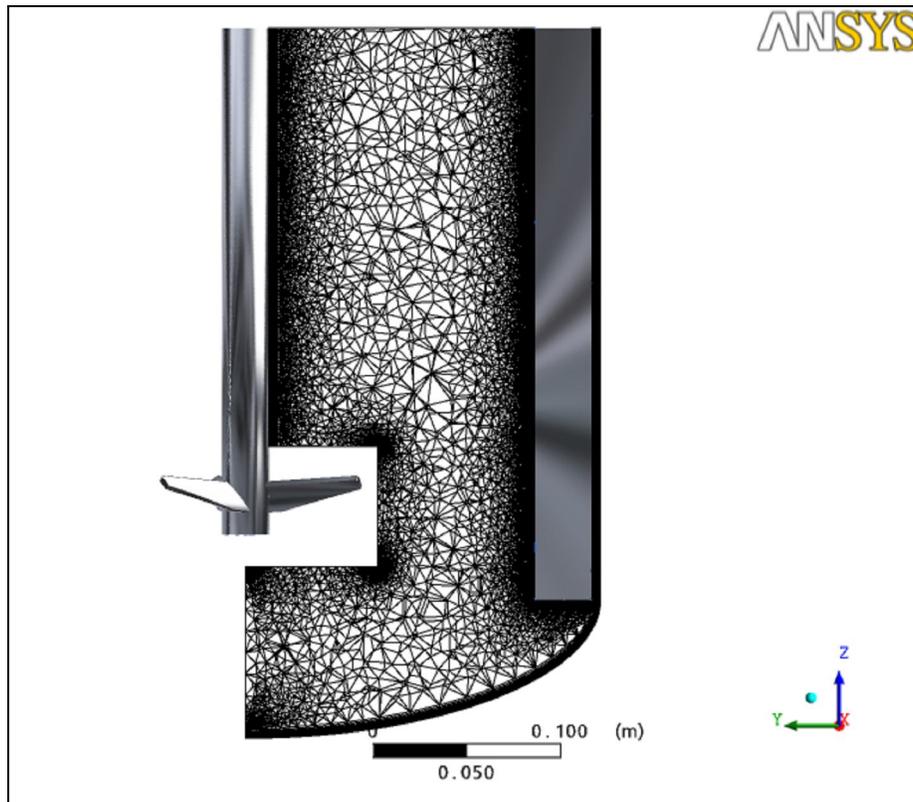


**Figura 4.6.** Plano horizontal da malha gerada no domínio do impelidor.



**Figura 4.7.** Detalhe da camada de prismas na pá do impelidor.

A Figura 4.8 mostra a malha gerada no domínio do tanque, que também teve camada de prismas na parede e nas chicanas.



**Figura 4.8.** Detalhe da malha no domínio do tanque.

O número total de elementos da malha ficou em torno de 3,2 milhões no domínio do tanque e 500.000 no domínio do impelidor.

#### **4.2.2. Condições de Contorno das Simulações**

##### Simulações com água:

Inicialmente foram feitas simulações apenas com água para a modificação do ângulo da ponta da pá do KPC e medir a influência no número de potência e no número de bombeamento.

##### Simulações com água e areia:

Após a otimização do impelidor KPC, foram feitas simulações para a suspensão de areia em água, para confirmação do resultado.

As condições de contorno para ambas simulações são descritas na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3.** Condições de contorno.

local	tipo	especificações
Paredes	Parede lisa	Condição de não-escorregamento
Topo do tanque	abertura	Pressão relativa=0 Pa
Eixo do impelidor	Parede rotativa	Velocidade de rotação=40 rps
Interface entre os domínios	Interface	<i>Frozen rotor</i>
Simetrias do tanque e do impelidor	Simetria	Modelo de interface: <i>rotational periodicity</i>

Outros parâmetros utilizados nas simulações:

- Esquema utilizado de interpolação no espaço – *High order Upwind*.
- Esquema utilizado de interpolação no tempo – *First Order Backward Euler Scheme*, que é um esquema implícito de primeira ordem de avanço no tempo.
- Passo de tempo = 0,001 s.

#### 4.2.3. Validação Numérica

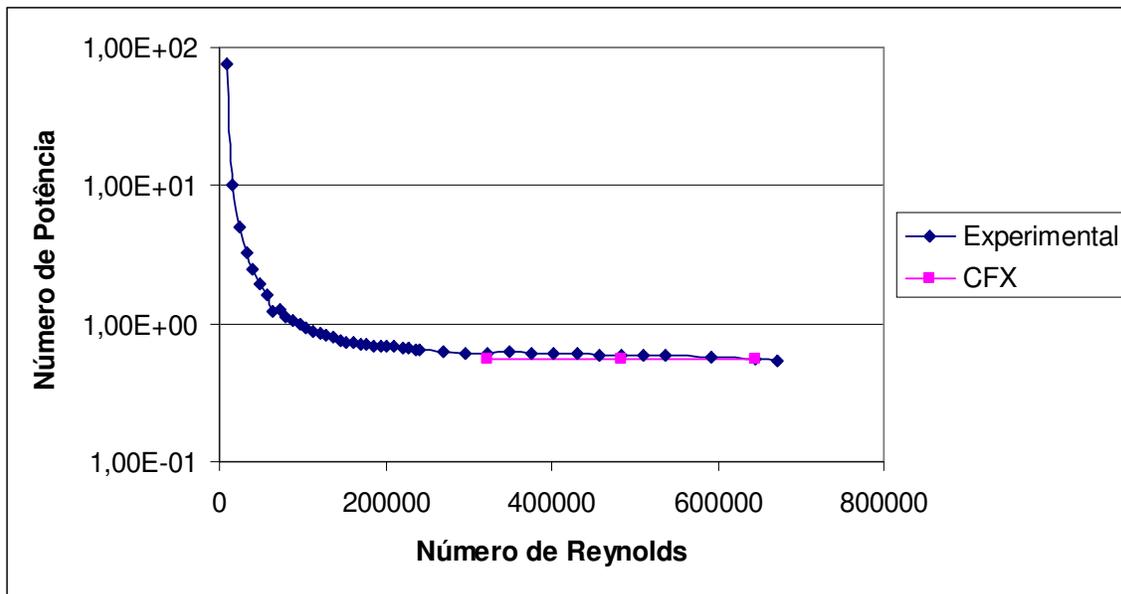
Para a validação, foi feita uma curva de número de potência em função do número de Reynolds com a média dos resultados dos ensaios.

Nas regiões laminar e de transição, a velocidade é muito baixa e podem ocorrer erros de leitura no torquímetro. Nestes casos, um trabalho experimental mais detalhado, com líquidos viscosos, deveria ser feito para a comparação com a

simulação. Por este motivo, foram feitas apenas simulações na região turbulenta, onde o número de Reynolds varia de  $3 \times 10^5$  a  $6 \times 10^5$ .

Foram feitas três simulações para a validação, nas rotações de 20, 30 e 40 rps. Os resultados obtidos foram colocados juntamente com a curva experimental de número de potência em função do número de Reynolds.

A Figura 4.9 mostra os resultados obtidos.



**Figura 4.9.** Número de potência em função do número de Reynolds.

Observa-se que, na região comparada, os dados experimentais e simulados estão muito próximos. No intuito de se obter informações mais detalhadas acerca da qualidade das simulações, calcularam-se os desvios normalizados dos resultados obtidos nas simulações com relação aos dados experimentais de número de potência ( $N_p$ ), chamado de *desv*, através da Equação 4.2.

Este parâmetro fornece informações sobre a relação entre ordens de grandeza e do afastamento médio dos resultados numéricos obtidos quando comparados aos dados experimentais.

$$desv = \left| \frac{N_{P(exp)} - N_{P(sim)}}{N_{P(sim)}} \right| \quad (4.2)$$

A Tabela 4.4 contém os valores de  $N_P$  experimentais e simulados comparados, bem como os valores dos desvios.

**Tabela 4.4.** Valores de número de potência experimental e simulados e desvios.

Rotação (rps)	$N_P$ experimental	$N_P$ simulado	Desv
20	5,48E-01	6,11E-01	0,104
30	5,53E-01	5,95E-01	0,072
40	5,57E-01	5,56E-01	0,003

A média dos valores de *desv* alcançada foi de  $\pm 0,06$ , considerada satisfatória.

#### 4.2.4. Simulações com Água

Nesta parte do trabalho analisou-se as simulações para otimização do impelidor KPC.

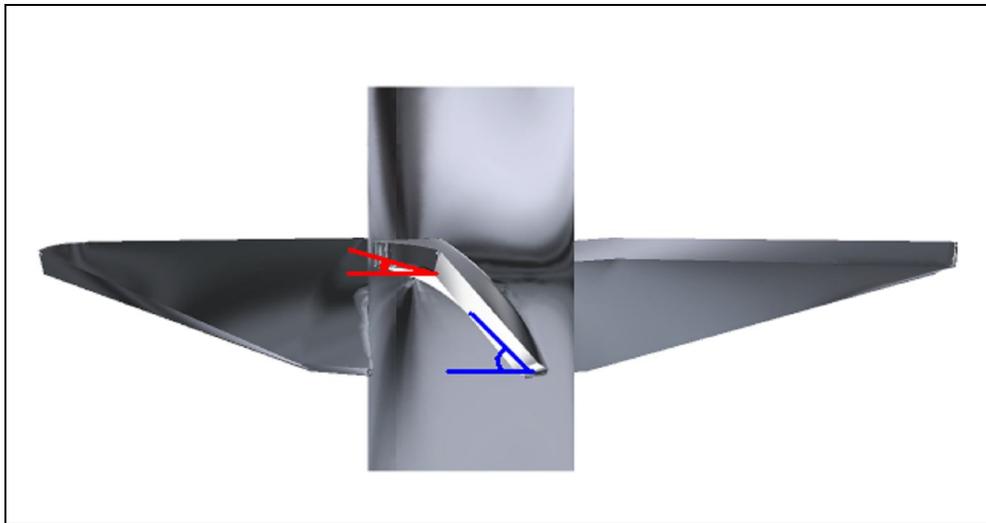
Os efeitos devido à presença da camada limite em escoamentos comuns na Engenharia, tais como escoamentos em torno de uma asa, ao redor de um automóvel ou de um submarino, têm sido fonte de pesquisa ao longo das últimas décadas. A transição da camada limite de laminar para turbulenta e o seu descolamento causam variações no arrasto e na sustentação do corpo. Estes efeitos são indesejáveis e técnicas para o controle da transição e do descolamento da camada limite devem ser utilizadas para amenizá-las.

Estes estudos foram utilizados como base para a otimização do impelidor KPC. A eficiência de um impelidor é notavelmente influenciada por ajustes no ângulo da pá. Menores ângulos de pá garantem um bom desempenho em relação à resistência de escoamento, porém alcançam baixo bombeamento. Já os ângulos maiores causam o efeito contrário.

O ângulo recomendado para pás é aquele em que o impelidor atua como uma asa, produzindo muito mais sustentação do que arraste. Na prática, este ângulo é de  $45^\circ$ . Entretanto, devido à forma dos impelidores de alta eficiência, apenas parte do impelidor atua nas condições de máxima eficiência.

A ponta da pá é a região do impelidor que possui a maior velocidade, produzindo o maior bombeamento. Portanto, o projeto do impelidor deve posicionar a pá em um ângulo que proporcione melhor eficiência em sua extremidade.

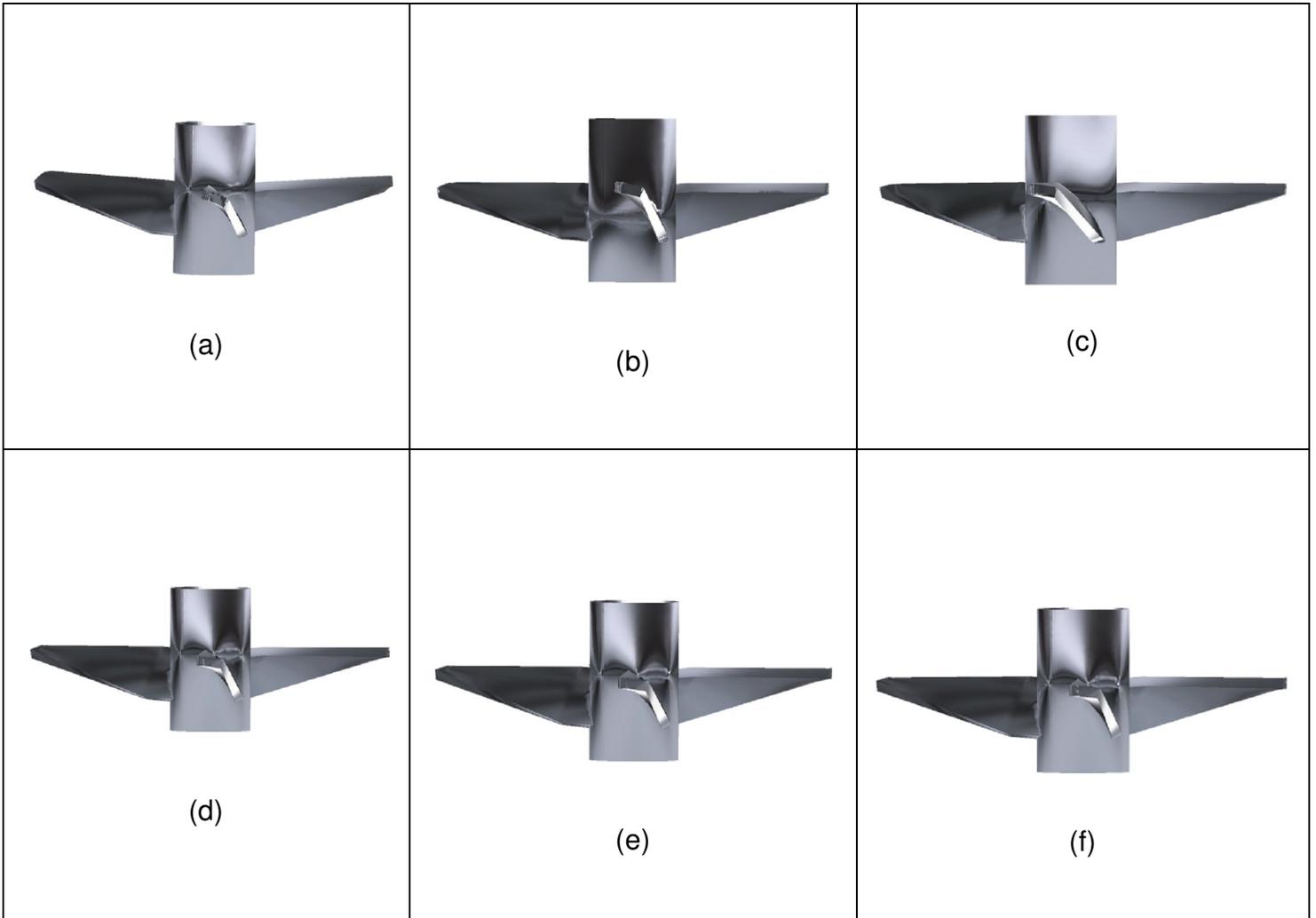
O impelidor que será projetado através das simulações em CFD terá a vantagem de ter ângulos distintos entre a raiz e a ponta da pá do impelidor. Esta angulação diferente permite a otimização de impelidores de bombeamento axial, como é o caso do KPC. A Figura 4.10 mostra os ângulos da raiz e da ponta da pá do impelidor KPC.



**Figura 4.10.** Ângulo da ponta da pá, em vermelho, e da raiz, em azul.

Um estudo de otimização de pás com diferentes ângulos na raiz e nas pontas de impelidores foi apresentado por SPOGIS e NUNHEZ (2009), que fizeram uma otimização multi-objetivo, obtendo um aumento na capacidade de bombeamento do impelidor e da homogeneidade de mistura.

No presente trabalho foram estudados sete diferentes impelidores, sendo o inicial com ângulo de  $45^{\circ}$ , e seis variações de ângulos nas pontas das pás. A Figura 4.11 ilustra os diferentes impelidores analisados.



**Figura 4.11.** Geometrias dos impelidores KPC. (a) Ângulo na ponta da pá de 25º (b) Impelidor com ângulo de 15º. (c) Ângulo na ponta de 10º. (d) Ângulo na ponta de 9º. (e) Ângulo na ponta de 8º. (f) Ângulo na ponta de 7º.

A medida de eficiência de um impelidor foi feita através de um número que relaciona os números de potência e de bombeamento e a área do impelidor. Este número foi chamado de consumo e é dado pela Equação 4.3.

$$Consumo = \frac{N_p / N_Q}{A} \quad (4.3)$$

Onde A é a área da pá.

A consideração da área neste número é muito importante, pois uma pequena variação neste valor pode causar uma grande diferença na potência e no bombeamento. Este é o primeiro trabalho que considera a influência da área da pá na otimização de impelidores.

Os valores da rotação, densidade e viscosidade são dados na Tabela 4.5.

**Tabela 4.5.** Constantes utilizadas para o cálculo dos números adimensionais.

Rotação	40 rps
Densidade	1000 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade	0,001 Pa.s

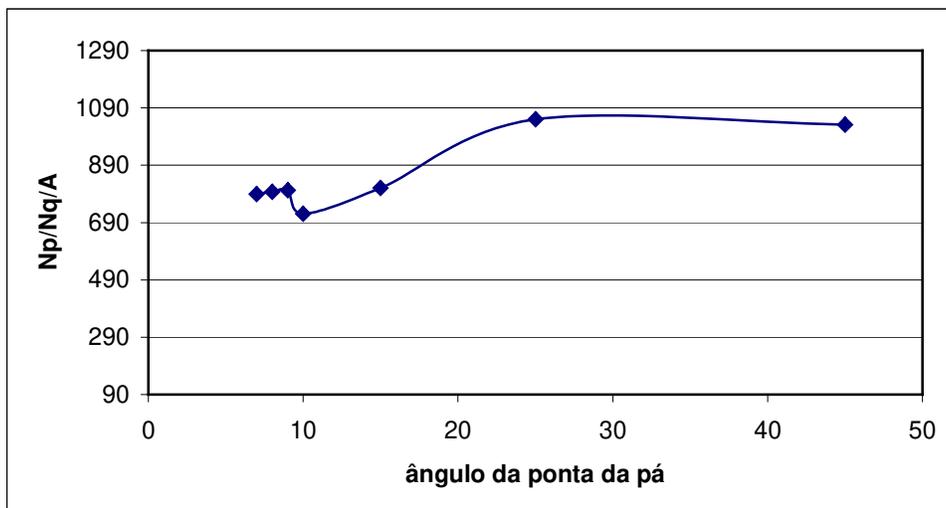
O número de potência mede a potência gasta pelo impelidor em determinada rotação, já o número de bombeamento mede a capacidade de bombeamento deste impelidor na mesma rotação. Portanto, um impelidor eficiente deve promover um maior bombeamento com menor gasto de potência.

Foram feitas diversas simulações variando-se o ângulo da ponta de pá e para cada uma delas foi calculada o número de potência, o número de bombeamento e a área. Estes valores estão mostrados na Tabela 4.6.

**Tabela 4.6.** Valores para o cálculo do consumo dos impelidores.

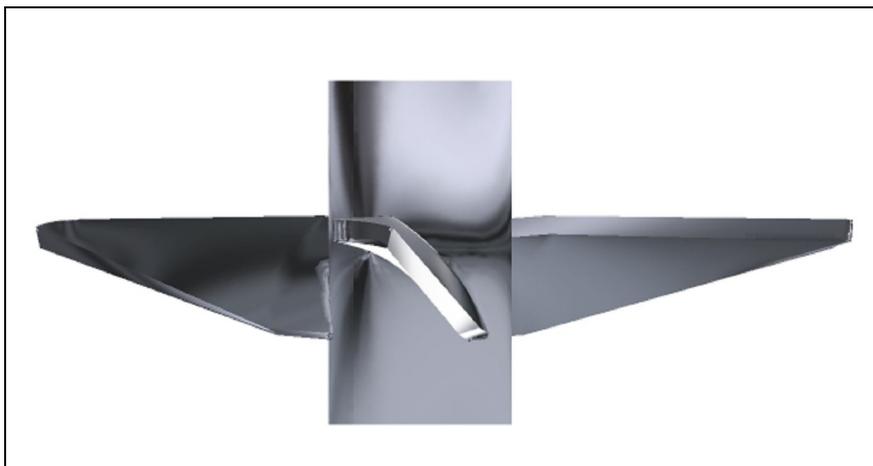
Impelidor	Área (m <sup>2</sup> )	Q (m <sup>3</sup> /s)	N <sub>q</sub>	Torque (Nm)	Potência	N <sub>p</sub>	N <sub>p</sub> /N <sub>q</sub> /A
45_7	0,00307	-0,0125	-0,152	3,101	779,26	0,369	789,48
45_8	0,00307	-0,0125	-0,153	3,147	790,81	0,374	797,66
45_9	0,00307	-0,0126	-0,154	3,199	803,95	0,380	802,18
45_10	0,00313	-0,0139	-0,169	3,211	806,92	0,382	720,09
45_15	0,00314	-0,0134	-0,164	3,503	880,31	0,416	810,10
45_25	0,00317	-0,0138	-0,168	4,708	1183,23	0,560	1050,01
45_45	0,00317	-0,0139	-0,170	4,683	1177,09	0,557	1031,48

Os dados de consumo e ângulo de ponta de pá foram colocados em um gráfico, mostrado na Figura 4.12.



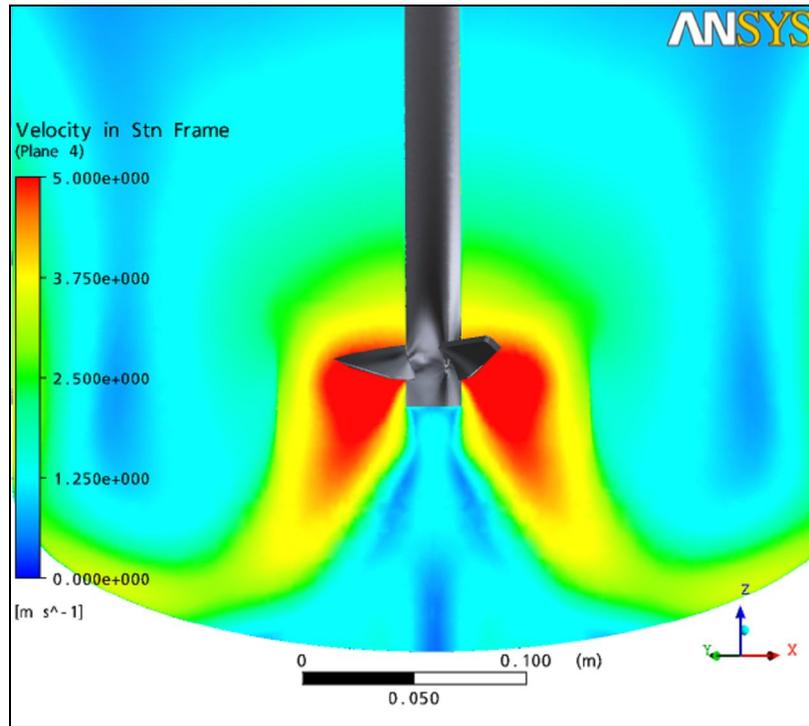
**Figura 4.12.** Comparação de consumo para vários ângulos de ponta de pá.

O impelidor que apresentou um menor consumo foi aquele que apresenta um ponto de mínimo na figura, ou seja, 10°. Uma inclinação menor na ponta da pá causa um novo descolamento na camada limite, diminuindo a eficiência do impelidor, o que explica a descontinuidade do gráfico. Portanto, o impelidor KPC com 45° na raiz e 10° na ponta da pá é o impelidor otimizado. A Figura 4.13 ilustra sua geometria.

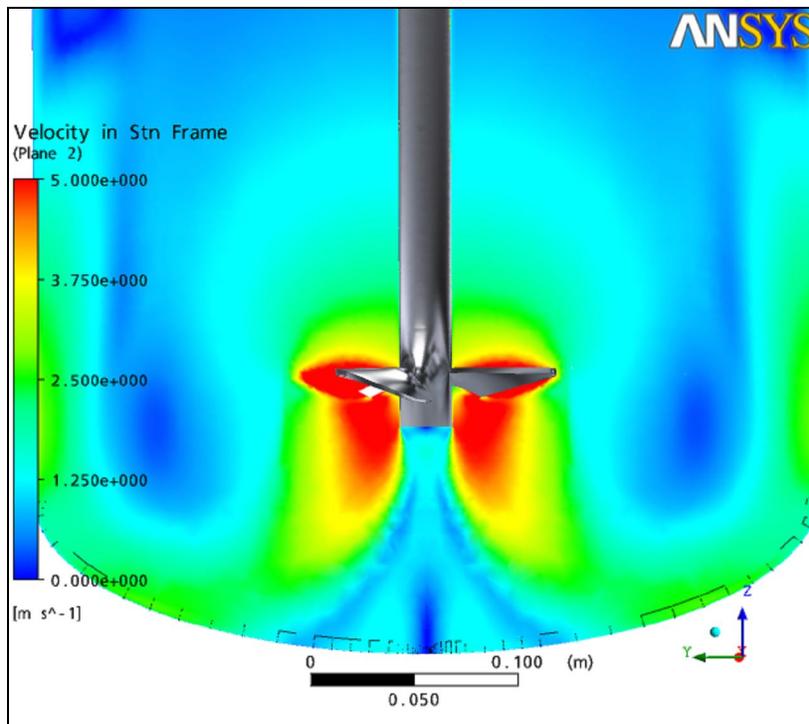


**Figura 4.13.** Impelidor KPC otimizado.

As Figuras 4.14 e 4.15 mostram o plano vertical de velocidades na região abaixo das pás para impelidor inicial e o otimizado.



**Figura 4.14.** Plano de velocidades do impelidor original.

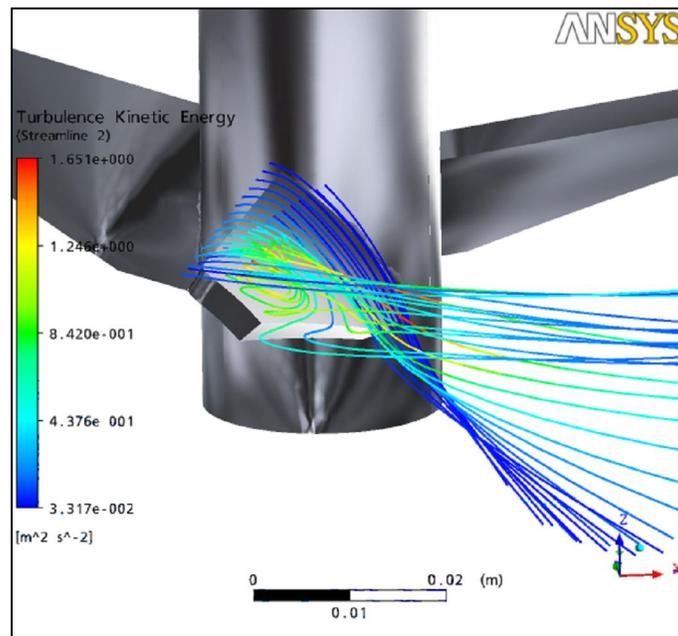


**Figura 4.15.** Plano de velocidades do impelidor KPC otimizado.

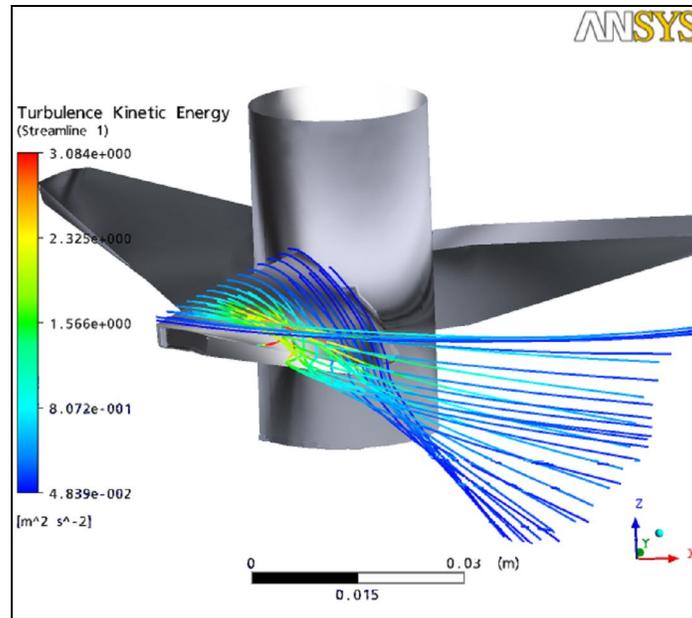
Pela análise das Figuras 4.14 e 4.15, percebe-se que, no impelidor otimizado, a velocidade está mais concentrada logo abaixo das pás do impelidor, enquanto que no impelidor inicial esta se encontra mais distribuída no tanque.

O comportamento das velocidades no impelidor otimizado favorece a suspensão de sólidos que poderiam ser depositados no fundo do tanque.

Com a visualização das linhas de corrente na ponta da pá, poderemos observar o descolamento da camada limite, conforme as Figuras 4.16 e 4.17.



**Figura 4.16.** Linhas de corrente do impelidor KPC original.



**Figura 4.17.** Linhas de corrente do impelidor KPC otimizado.

O descolamento da camada limite é percebido nos dois impelidores principalmente nas pontas das pás, exatamente onde foram feitas as modificações do ângulo.

Entretanto, percebe-se que a transição da camada limite de laminar para turbulenta e o seu descolamento, são muito mais suaves no impelidor otimizado. Com o ângulo de  $10^\circ$  na ponta, a pá produz mais sustentação do que arraste, reproduzindo o comportamento ideal para impelidores.

#### 4.2.5. Simulações com Areia e Água

O objetivo destas simulações foi comparar o comportamento dos impelidores original e otimizado em uma suspensão de sólidos. Para tanto, o mesmo tanque de mistura foi simulado com uma suspensão de areia em água.

Para saber se haverá sedimentação da areia, pode-se utilizar a velocidade terminal, definida no capítulo 2. Para a suspensão de areia e água em regime turbulento, a velocidade terminal é dada por:

$$U_T = 1,75 \sqrt{\frac{d_p g (\rho_p - \rho)}{\rho}} \quad (4.4)$$

As propriedades da areia e os dados do impelidor são mostrados na Tabela 4.7.

**Tabela 4.7.** Propriedades da areia e do impelidor.

Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	2050
Diâmetro da partícula (μm)	100
Fração volumétrica	40%
Diâmetro do impelidor (mm)	152
Rotação (rps)	10

A rotação utilizada nesta simulação foi de 10 rps, para representar uma situação pior do que a apresentada anteriormente e confirmar a eficiência do novo impelidor.

A velocidade terminal neste caso será:

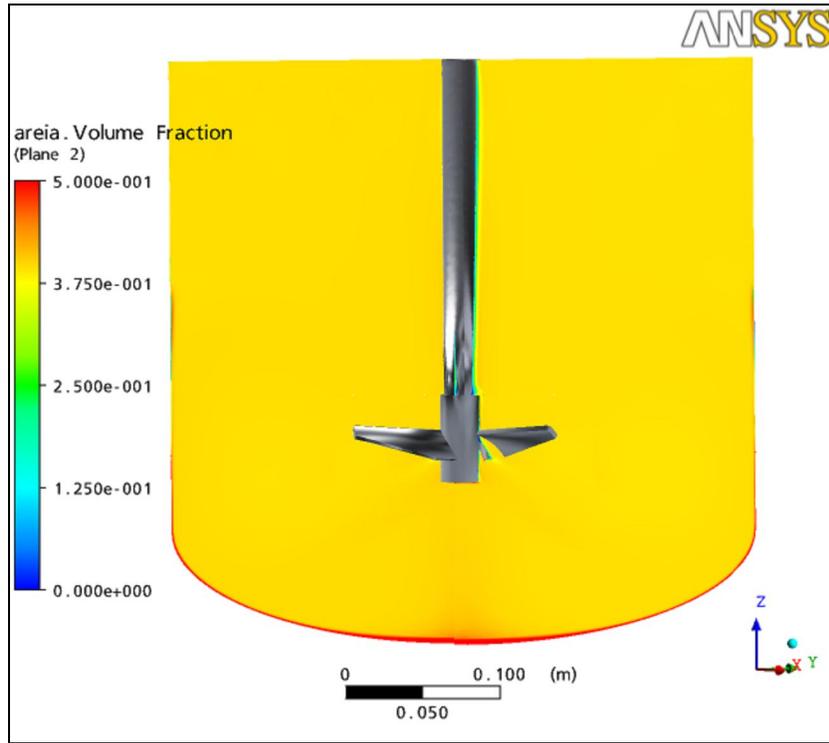
$$U_T = 1,75 \sqrt{\frac{10^{-4} \cdot 9,81(2050 - 1000)}{1000}}$$

$$U_T = 0,056 \text{ m / s}$$

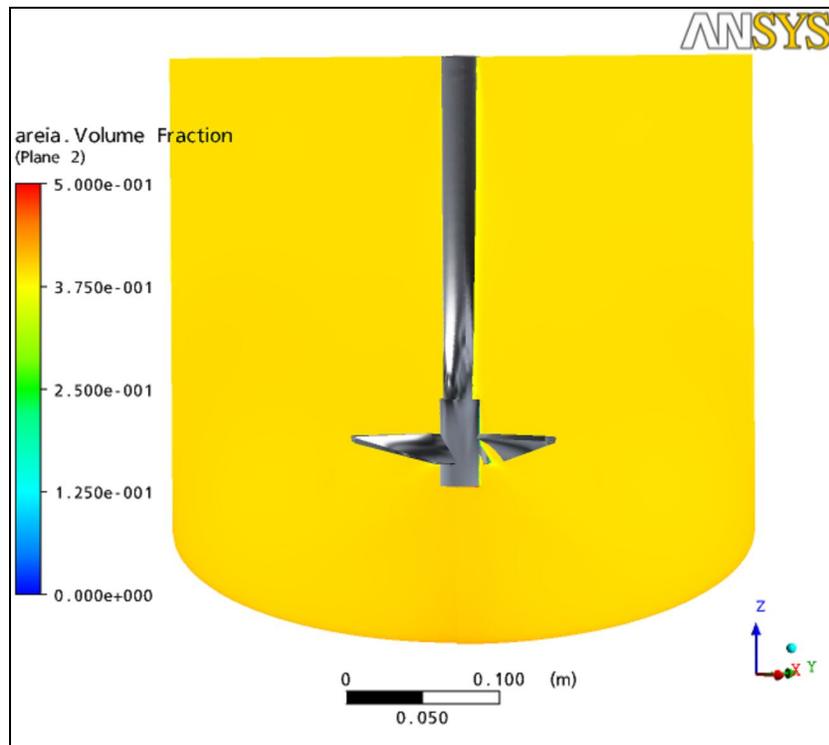
Para velocidades entre 0,0025 m/s e 0,1 m/s, já ocorre uma certa sedimentação (JOAQUIM JUNIOR et al, 2007), e a simulação deve ser feita para observar o efeito do impelidor sobre as partículas.

Em uma suspensão de sólidos, a geometria deve sofrer algumas modificações em relação ao tanque que só tem a fase líquida presente, para que não ocorra o depósito de sólidos no fundo. Neste trabalho estipulou-se a relação  $D/T=1/3$ , que é a mais utilizada industrialmente para suspensões.

As simulações foram realizadas para o impelidor original, com 45° na ponta, e para o otimizado, com 10° na ponta da pá. Os perfis da concentração de sólidos no tanque para cada caso são apresentados nas Figuras 4.18 e 4.19.



**Figura 4.18.** Concentração de sólidos no tanque com o impelidor original.



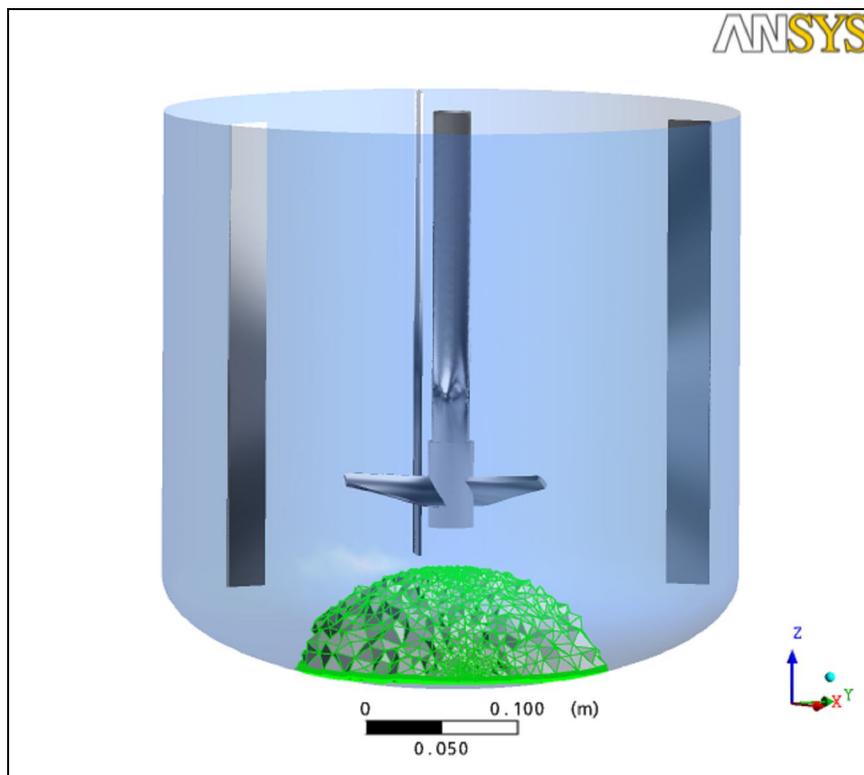
**Figura 4.19.** Concentração de sólidos no tanque com o impelidor otimizado.

Nas figuras, a cor vermelha indica maior concentração de areia, enquanto a azul mostra a menor concentração.

Pela análise do perfil da concentração de sólidos do tanque com o impelidor original, podemos observar que, apesar de a concentração estar homogênea ao longo do tanque, há uma camada de sólidos depositados no fundo, mostrando que a suspensão total não foi alcançada.

Já no impelidor otimizado, a Figura 4.19 mostra que a concentração de sólidos está mais homogênea em todo tanque, inclusive no fundo.

Uma maneira de quantificar a concentração de sólidos no fundo de cada tanque, é a geração de um volume de controle na área de interesse, conforme a Figura 4.20.



**Figura 4.20.** Volume de controle no fundo do tanque.

Este volume de controle foi gerado nos tanques com o impelidor inicial e o otimizado, e calculou-se a concentração nesta região. Os resultados são apresentados na Tabela 4.8.

**Tabela 4.8.** Concentrações no volume de controle.

Impelidor	Concentração Volumétrica no Volume
Inicial (45_45)	0,477
Final (45_10)	0,406

Observa-se que a concentração volumétrica de sólidos no volume de controle é maior no tanque equipado com o impelidor original, confirmando o desempenho superior do impelidor otimizado.

## 5. CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

### 5.1. Conclusões

Analisando todo o trabalho, podemos concluir que o objetivo principal, encontrar o impelidor KPC otimizado, foi atingido. Este impelidor possui 45° na raiz da pá e 10° na ponta da pá.

Este resultado é considerado confiável pelos seguintes motivos:

- O modelo escolhido para reproduzir o comportamento de um tanque de mistura com água teve seus resultados validados experimentalmente, representando com confiabilidade a realidade;
- A metodologia experimental mostrou reprodutibilidade dos dados obtidos;
- O modelo de turbulência SST previu o descolamento da camada limite na ponta das pás dos impelidores, conforme esperado;
- O valor da variável  $y^+$  atingido foi satisfatório para prever o comportamento na ponta das pás;
- A abordagem euleriana-euleriana apresenta uma boa aproximação para os sistemas estudados;
- O modelo de Gidaspow para força de arraste mostrou-se coerente nas simulações com alta concentração de sólidos;
- O impelidor com 10° na ponta da pá confirmou seu melhor desempenho quando comparado ao impelidor inicial em uma suspensão de areia e água.

### 5.2. Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros sugere-se os seguintes tópicos:

- Estudar a otimização do impelidor KPC utilizando o modelo de equações bifásico;

- Realizar um trabalho experimental mais aprofundado, com fluidos de diferentes viscosidades para o levantamento da curva do número de potência em função do número de Reynolds;
- Estudar outros parâmetros para a otimização, como a altura do impelidor e o fundo do tanque.
- Calcular o valor do parâmetro S, utilizado na correlação de ZWITERING (1957), para o impelidor KPC.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALDI, G., CONTI, R., ALARIA, E. Complete Suspension of Particles in Mechanically Agitated Vessels, *Chemical Engineering Science*, v. 31, p.21-25, 1977.

BISWAS, P.K., DEV, S.C., GODIWALLA, K.M., SIVARAMAKRISHNAN, C.S. Effect of Some Design Parametres on the Suspension Characteristics of a Mechanically Agitated Sand-water Slurry System, *Materials and Design*, v.20, p.253-265, 1999.

BRUCATO, A., CIOFALO, M., GRISAFI, F., MICALÉ, G. Numerical Prediction of Flow Fields in Baffled Stirred Vessels: a Comparison of Alternative Modelling Approaches, *Chemical Engineering Science*, v. 53, p. 3653-3684, 1998.

BRUNETTI, F., *Mecânica dos Fluidos*. Prentice-Hall, 2004, 424p.

CHUDACEK, M. W. Solids Suspension Behaviour in Profiled Bottom and Flat Bottom Mixing Tanks, *Chemical Engineering Science*, v. 40, p. 385-392, 1985.

DEGLON, D.A., MEYER C.J. *CFD modeling of stirred tanks: Numerical considerations*, Minerals Engineering, v.19, p. 1059-1068, April 2006.

HAMILL, N. CFD Comes of Age in the CPI: More Companies Are Using Computational Fluid Dynamics to Solve Equipment and Process Problems. *Chemical Engineering*, v. 103, p. 68-72, 1996.

HARNBY, N., EDWARDS, M. F., NIENOW, A. W. *Mixing in the Process Industries*. Second Edition. Butterworth-Heinemann, 1992, 414 p.

JOAQUIM JUNIOR C.F., CEKINSKI E., NUNHEZ J.R., URENHA L.C. *Agitação e Mistura na Indústria*. Rio de Janeiro: LTC, 2007, 222 p.

KASAT, G.R., KHOPKAR, A.R., RANADE, V.V., PANDIT, A.B. CFD Simulation of Liquid-phase Mixg in Solid-liquid Stirred Reactor, *Chemical Engineering Science*, v.63, p.3877-3885.

LJUNGQVIST, M., RASMUSON, A. Numerical Simulation of the Two-Phase Flow in an Axially Stirred Reactor. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 79, p. 533-546, 2001

MALISKA C.R. *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*. Florianópolis: LTC, 2004, 472 p.

Manual Ansys CFX Release 11.0.

MENTER F.R. *Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications*. AIAA Journal, v. 32, No. 8, p. 1598-1605, August 1994.

MICALE, G., GRISAFI, F., RIZZUTI, L., BRUCATO, A. CFD simulation of particle suspension height in stirred vessels. *Trans IChemE*, v. 82, p. 1204-1213, September 2004.

MICALE, G., MONTANTE, G., GRISAFI, F., BRUCATO, A., GODFREY, J. CFD Simulation of Particle Distribution in Stirred Vessels, *Trans IChemE*, v. 78, p. 435-444, 2000.

MONTANTE, G., MICALE, G., MAGELLI, F., BRUCATO, A. Experiments and CFD Predictions of Solid Particle Distribution in a Vessel Agitated with Four Pitched Blade Turbines, *Trans IChemE*, v. 79, p. 1005-1010, 2001.

MURTHY, B. N., JOSHI J. B. Assessment of standard  $k-\epsilon$ , RSM and LES turbulence models in a baffled stirred vessel agitated by various impeller designs. *Chemical Engineering Science*, v. 63, p. 5468 – 5495, July 2008.

MUSIL, L., VLK, J. Suspending Solid Particles in an Agitated Conical-Bottom Tank, *Chemical Engineering Science*, v. 33, p. 1123-1131, 1978.

NAGATA, S., *Mixing: Principle and Applications*, Wiley, 1975.

NARAYANAN, S., BHATIA, V. K., GUHA, D. K., RAO, M. N. Suspension of Solids by Mechanical Agitation, *Chemical Engineering Science*, v. 24, p. 223-230, 1968.

NIENOW, A.W. Suspension of Solid Particles in Turbine Agitated Baffled Vessels, *Chemical Engineering Science*, v.23, p.1453-1459, 1968.

NOLETO, L.G. Estudo Numérico do escoamento Turbulento em Modelos Florestais. Dissertação de Mestrado, Publicação DM-103-A/06, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006, 96p.

OCHIENG, A., LEWIS, A. E. CFD simulation of solids off-bottom suspension and cloud height. *Hydrometallurgy*, v. 82, p. 1-12, February 2006.

OLDSHUE, J.Y., HERBST, N.R., POST T.A. A Guide to Fluid Mixing, Lightnin, 1995.

PAUL, E. L., ATIEMO-OBENG, V. A., KRESTA, S. M., Handbook of Industrial Mixing – Science and Practice. New Jersey, 2004, 1377 p.

RANADE, V.V. Numerical Simulation of Dispersed Gas-liquid Flows. *Sadhana*, v.17, p. 237-273, 1992.

SHA, Z., OINAS, P., LOUHI-KULTANEN, M., YANG, G., Seppo Palosaari. Application of CFD simulation to suspension crystallization—factors affecting size-dependent classification, *Powder Technology*, v. 121, p. 20–25, 2001.

SOARES, C. Desenvolvimento de uma Metodologia para Avaliação Numérica e Experimental do escoamento Líquido/Vapor em Colunas de Destilação. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química Campinas, SP, 2005.

SPOGIS, N., NUNHEZ, J.R. Design of a High-Efficiency Hydrofoil Through the Use of Computational Fluid Dynamics and Multiobjective Optimization, *AIChE Journal*, v.55, No 7, p.1723-1735, 2009.

TENNEKES, H., AND LUMLEY, J. A First Course in Turbulence. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1972.

WICHTERLE, K. Conditions for Suspension of Solids in Agitated Vessels, *Chemical Engineering Science*, v. 43, p. 467-471, 1988.

ZWITERING, T.N. Suspending of Solid Particles in Liquid by Agitators, *Chemical Engineering Science*, v. 8, p. 244, 1957.