



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPIRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA

DONIZETTE BORGES JUNIOR

**ANÁLISE HIDRODINÂMICA NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE CUPONS EM
VASOS AGITADOS MECANICAMENTE**

São Mateus

2021

DONIZETTE BORGES JUNIOR

**ANÁLISE HIDRODINÂMICA NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE CUPONS EM
VASOS AGITADOS MECANICAMENTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Energia. Orientador: Prof. Dr. Daniel da Cunha Ribeiro

São Mateus

2021

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

B732a Borges Junior, Donizette, 1990-
ANÁLISE HIDRODINÂMICA NUMÉRICA E
EXPERIMENTAL DE CUPONS EM VASOS AGITADOS
MECANICAMENTE / Donizette Borges Junior. - 2021.
117 f. : il.

Orientador: Daniel da Cunha Ribeiro.
Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Universitário Norte do Espírito Santo.

1. Hidrodinâmica. 2. Análise numérica. 3. Fluidodinâmica computacional. I. da Cunha Ribeiro, Daniel. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Universitário Norte do Espírito Santo. III. Título.

CDU: 620.9

DONIZETTE BORGES JUNIOR

**ANÁLISE HIDRODINÂMICA NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE CUPONS EM
VASOS AGITADOS MECANICAMENTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Energia. Orientador: Prof. Dr. Daniel da Cunha Ribeiro

Aprovado em 03 de setembro de 2021.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Daniel da Cunha Ribeiro
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. Bruno Venturini Loureiro
Universidade Federal do Espírito Santo
Coorientador

Prof. Dr. Renato Nascimento Siqueira
Instituto Federal do Espírito Santo

São Mateus

2021



Emitido em 15/09/2021

FOLHA DE APROVAÇÃO-TCC N° 4/2021 - SMT-CCEM (11.02.31.01.05.07)

(N° do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 15/09/2021 15:02)
RENATO DO NASCIMENTO SIQUEIRA
PROFESSOR DO ENSINO BASICO TECNICO E TECNOLOGICO
SMT-CCEM (11.02.31.01.05.07)
Matrícula: 1421467

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sipac.ifes.edu.br/documentos/> informando seu número: 4, ano: 2021, tipo: FOLHA DE APROVAÇÃO-TCC, data de emissão: 15/09/2021 e o código de verificação: 876bed6a68



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por
BRUNO VENTURINI LOUREIRO - SIAPE 1813047
Departamento de Engenharia Mecânica - DEM/CT
Em 18/11/2021 às 14:56

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/311145?tipoArquivo=O>



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por DANIEL DA CUNHA RIBEIRO - SIAPE 1956013 Departamento de Engenharia e Tecnologia - DET/CEUNES Em 08/02/2022 às 09:12

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/355405?tipoArquivo=O>

Dedico este trabalho à minha avó Lindinalva Gusmão da Silva, que não está entre nós, mas muito me ensinou e ficaria muito feliz por esta conquista. Não menos importante, à minha esposa Gislaine que me permite todos os dias o seu companheirismo e ser amado, e aos meus pais Donizette e Marisa que abdicaram de muito em suas vidas, para que momentos como este seja realizável.

Agradeço ao orientador Prof. Dr. Daniel da Cunha Ribeiro, pela oportunidade, ensinamentos e compreensão em momentos difíceis.

Fico muito grato aos membros da banca examinadora, Prof. Dr. Bruno Venturini Loureiro, pelas contribuições para o aprimoramento deste trabalho e Prof. Dr. Renato do Nascimento Siqueira, por ter aceitado o convite de participar como membro externo da banca, mas que muito me ensinou durante a graduação em engenharia mecânica no Instituto Federal do Espírito Santo; aos professores do programa de pós graduação em energia-PPGEN da Universidade Federal do Espírito Santo que de forma indireta contribuíram para aprimoramento deste trabalho.

Agradeço também, à Petrobras, pelo incentivo por meio de bolsas de estudos, no qual foi fundamental para continuar os trabalhos em tempos de pandemia do vírus COVID-19.

RESUMO

Fontes de hidrocarbonetos em terra tornaram-se cada vez mais escassos e, com isso, reservas de difícil acesso requerem soluções e tecnologias cada vez mais desafiadoras. Dentre os desafios intrínsecos à produção neste tipo de reservas, a incrustação inorgânica destaca-se como o maior deles. Tanques agitados com gaiolas rotativas (RC) em escala de laboratório tem se mostrado eficiente para o estudo da cinética da incrustação. Neste trabalho foi proposto um vaso agitado com gaiola rotativa e impelidor radial não convencional (MQ2021) no qual buscou-se modelar numericamente (CFD) e experimentalmente a hidrodinâmica no interior do tanque, mapear a formação de vórtices e avaliar a influência de janelas de visualização sobre o escoamento. O teste experimental para análise do vórtice formado foi realizado em dois tanques fabricados, um de acordo com a norma ASTM G170 e um outro replica do tanque original, porém sem as janelas de visualização e sem impelidor. Já para as simulações em CFD, foram realizadas em um *software* ANSYS CFX v. 15.0 adotando o modelo SST k-omega (*Shear Stress Transport*) como fechamento para a turbulência e validadas com os resultados do artigo de Vera *et al* (2017). As janelas de visualização não influenciam no escoamento, a ausência do impelidor prejudica a cinética de incrustação. O tanque ASTM G170 apresentou parâmetros superiores ao proposto neste trabalho para estudo da cinética de incrustação.

Palavras chave: *Shear Stress Transport*, Tanques sem chicanas, Cupons.

ABSTRACT

Onshore hydrocarbon sources are becoming increasingly scarce and, with that, easily accessible reserves, increasingly challenging solutions and technologies. Among the intrinsic challenges to production in this type of reserves, inorganic incrustation stands out as the biggest one. Laboratory-scale stirred tanks with rotating cages (RC) have been qualified for the study of fouling kinetics. In this work, an agitated vessel with rotating cage and unconventional radial impeller (MQ2021) was proposed, in which we sought to model numerically (CFD) and experimentally the hydrodynamics inside the tank, to map the formation of vortices and the influence on the flow. The experimental test for analysis of the formed vortex was carried out in two manufactured tanks, one in accordance with the ASTM G170 standard and another replica of the original tank, but without a viewing window and without an impeller. For the CFD simulations, they were performed in software ANSYS CFX. 15.0 adopting the k-omega SST model (Shear Stress Transport) as a closure for turbulence and validated with the results of the article by Vera *et al.* (2017). The viewing windows do not influence the flow, the absence of the impeller impairs the incrustation kinetics. The ASTM G170 tank parameters proposed in this work for the study of scale kinetics.

Keywords: *Shear Stress Transport*, unbaffled tank, Coupons.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Gaiola rotativa mais impelidor MQ2021 à esquerda e tanque agitado por gaiola rotativa em escala de laboratório à direita desenhados no software Solidworks. Fonte: O Autor.....	23
Figura 2: Incrustação inorgânica Carbonato de Cálcio ($CaCO_3$).....	29
Figura 3: Exemplo de incrustações inorgânicas: Sulfato de bário ($BaSO_4$) a esquerda e gipsita ($CaSO_4 \cdot H_2O$) Direita. Fonte: (COSMO,2013).....	30
Figura 4: Tanque padrão. Fonte: Adaptado (Jacobsen,2008).....	33
Figura 5: Exemplo do escoamento e vórtices gerado por impelidores do tipo radial. Fonte: (SPOGIS, 2002).....	34
Figura 6: Classificação dos agitadores de acordo com o padrão de escoamento predominante que eles produzem e com a faixa de viscosidades nas quais eles podem ser efetivamente usados. Fonte: Adaptado de (ZLOKAMIK, MARKO, 2001).....	35
Figura 7: Representação dos vórtices para Turbina Rushton. (A) vetor velocidade (B) Desenho esquemático dos vórtices. Fonte: Adaptado de (SU et al., 2018) e (COKER,2007).....	36
Figura 8: Esboço do padrão de escoamento no tanque agitado com o agitador LSB Fonte:(PAN et al., 2018).....	37
Figura 9: Domínio estacionário e rotativo na geometria. Fonte: (VEGEL,2013).....	39
Figura 10: Esquemático do sistema de gaiola rotativa. Fonte: Adaptado de ASTM G184.	40
Figura 11: Gaiola rotativa. Fonte: Adaptado de ASTM G184.....	41
Figura 12: Zonas distintas de escoamento para o sistema de teste do RC. Fonte Adaptado de ASTM G170.....	42

Figura 13: Modelo da gaiola rotativa usado nas simulações com identificação dos cupons. Fonte: O Autor	46
Figura 14: Distribuição da tensão de cisalhamento da parede nas superfícies do cupom para água a 20 graus Celsius e 850 rpm. Fonte: Adaptado de RUNSTEDTLER et al 2019.....	46
Figura 15: Esquemático da Gaiola rotativa simulada. Fonte: (RAMACHANDRAN, 2006)	47
Figura 16:Configuração das gaiolas rotativas. Fonte: Adaptado de (HIRANO et al, 2018)	49
Figura 17: Escoamento sobre os cupons para diferentes configurações do RC e rotação. Fonte: Adaptado de (HIRANO et al, 2018)	50
Figura 18: Distribuição da tensão de cisalhamento sobre os cupons. Fonte: (HIRANO et al, 2018)	51
Figura 19: Configuração RC modificada para testes eletroquímicos. Fonte: Vera et al (2017).....	52
Figura 20: Modelo RC e grade computacional. Fonte: Vera et al (2017).	52
Figura 21 : Gaiola Rotativa Fonte: (NICHOLS et al.,2016).....	54
Figura 22: Análises de estrôncio e bário versus tempo de testes do cilindro rotativo. Fonte: (NICHOLS et al.,2016)	55
Figura 23: Porcentagem de Ba e Sr em solução durante os testes de cilindro rotativo (RC). Fonte: (GRAHAM et al,2014).....	56
Figura 24: Comparação dos números de potência previstos com dados experimentais na literatura. Fonte: (LI et al., 2020)	58
Figura 25: Imagem dos impelidores (a) NR-3,0, $a = 0,003$ m; (b), NR - 1,5, $a = 0,0015$ m; (c) Impelidor dente de serra (d) Hockmeyer-D. Fonte: (MARTINÉZ et al. 2017)..	59

Figura 26: Valores do número de bombeamento dos impelidores NR-3,0 e NR1,5 comparados com os HSis(HockD - 2R eHockD - 4R).Fonte: (MARTINÉZ et al. 2017)	60
Figura 27: Sistemas sob investigação. Fonte: ((TAMBURINI et al., 2018)	61
Figura 28: Os resultados computacionais atuais para o número de bombeio em vasos com chicanas e sem chicanas para o número de Reynolds entre 0,2 e 600. Fonte: (TAMBURINI et al., 2018)	61
Figura 29: Comparação entre valores experimentais relatados na literatura e numéricos do número de potência com base no torque. Fonte: (MARTINÉZ et al. 2017)	62
Figura 30: Desenho do tanque agitado e turbina Rushton investigado. Fonte: Adaptado de (LI; XU, 2017)	63
Figura 31: O número de potência para tanques com e sem chicanas para o número de Reynolds variando de 0,2 a 105.Fonte: (TAMBURINI et al., 2018)	64
Figura 32: Vetor velocidade para diferentes planos em tanques agitados. (a) tanques sem chicanas (b) Tanques com chicanas. Fonte: (LI; XU, 2017)	65
Figura 33 : Fotografias instantâneas da forma do vórtice. Fonte: (PRAKASH et al., 2019)	67
Figura 34: Detalhes da malha superficial do tanque original: a esquerda a malha da parede do tanque; a direita, malha no RC e impelidor	76
Figura 35: Detalhes da malha superficial do tanque ASTM bifásico: a esquerda a malha da parede do tanque; a direita, malha no RC.	77
Figura 36: Detalhes da malha superficial do tanque liso (sem janelas + RC+impelidor): a esquerda a malha da parede do tanque; a direita, malha no RC e impelidor	78

Figura 37: Detalhes da malha superficial do tanque liso (sem janelas + RC): a esquerda a malha da parede do tanque; a direita, malha no RC.	79
Figura 38: Detalhes da malha superficial do Tanque ASTM: a esquerda a malha da parede do tanque; a direita, malha no RC.....	80
Figura 39: Definição dos contornos para as simulações: contornos externos (A) e internos (B) para o tanque original. Fonte: O autor	81
Figura 40: Definição dos contornos para as simulações: contornos externos (A) e internos (B) para o tanque ASTM G170. Fonte: O autor	82
Figura 41: Definição dos contornos para as simulações: contornos externos (A) e internos (B) para o tanque liso com impelidor e sem impelidor. Fonte: O autor.....	82
Figura 42: Fluxograma da metodologia utilizada no trabalho. Fonte: O Autor	83
Figura 43: Representação do reator original b) Geometria interna do reator com gaiola rotativa e impelidor.....	84
Figura 44: Geometria do tanque. Fonte: O autor.....	85
Figura 45: Geometria do impelidor e configuração do tanque. Fonte: O autor.....	85
Figura 46: Configuração do cupon. Fonte O autor	86
Figura 47: Tanque sem janelas	86
Figura 48: Tanque ASTM G170 para validação.	87
Figura 49: esquemático do sistema completo montado desenhado no software Solidworks.....	90
Figura 50: Tanque ASTM G170 apresentando o fundo do tanque chato e sem impelidor à esquerda e tanque liso com fundo do tanque abaulado à direita.....	91
Figura 51: Sistema rotativo tanque ASTM G170 à esquerda e tanque liso à direita.	91
Figura 52: Aparato experimental completo.....	92
Figura 53: Tensão de cisalhamento x Rotação.	94

Figura 54: Comparação vórtice de superfície livre experimental x bifásico a 300 RPM.	95
Figura 55: Campo de velocidade tanque ASTM G170. A esquerda é referente ao plano A e à direita plano B.	96
Figura 56: Contorno de velocidade tanque ASTM G170.	97
Figura 57: Vetor velocidade nas vizinhanças dos cupons.	97
Figura 58: Energia cinética turbulenta para o tanque ASTM G170 a 100 rpm.	98
Figura 59: Distribuição da tensão de cisalhamento tanque ASTM G170 a 100 RPM.	100
Figura 60: distribuição de $y +$ para 100 rpm.	100
Figura 61: Perfil de velocidade. a) tanque original b) tanque liso	101
Figura 62: Contorno de velocidade média. a) tanque original b) tanque liso	102
Figura 63: curva de potência das simulações com o tanque original e tanque liso.	102
Figura 64: Energia cinética turbulenta. a) tanque original b) tanque liso	103
Figura 65: Comparação da tensão de cisalhamento máxima entre o Tanque original e tanque sem janelas nos	104
Figura 66: Campo de velocidade à 100 rpm para o tanque liso fabricado.	105
Figura 67: Contorno de velocidade à 100 rpm tanque liso sem impelidor.	106
Figura 68: Vetor velocidade tanque liso sem impelidor à 100 rpm.	106
Figura 69: Energia cinética turbulenta para o tanque liso à 100 rpm.	107
Figura 70: distribuição de $y +$ para 100 rpm.	108
Figura 71: distribuição da tensão de cisalhamento tanque liso a 100 RPM.	108
Figura 72: Perfil de velocidade. a) vista lateral b) vista frontal	109
Figura 73: Contorno de velocidade para diferentes rotações.	110
Figura 74: Energia cinética turbulenta. a) vista frontal b) vista lateral	111

Figura 75: Fotografias instantâneas da forma do vórtice para o tanque liso e ASTM
G170.112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de incrustações mais comuns em campos petrolíferos. Fonte: (RIGOBELLO,2013)	28
Tabela 2: Principais tipos de deposições e respectivas causas. Fonte: (RIGOBELLO,2013)	31
Tabela 4: Distância adimensional da parede (y^+) para várias condições de escoamento. Fonte: Adaptado de RUNSTEDTLER, et al 2019.	45
Tabela 5: Comparação da tensão de cisalhamento usando a equação de Schmitt e Bakalli e os resultados computacionais. Fonte: Adaptado de (RAMACHANDRAN, 2006).	48
Tabela 6: Resultado experimental. Fonte: Adaptado de Vera et al, (2017.)	53
Tabela 7: Resultado CFD. Fonte: Adaptado de Vera et al, (2017).	53
Tabela 7: Comparação do número de potência para tanques agitados com e sem chicanas. Fonte: O Autor.	63
Tabela 14: condições iniciais.....	71
Tabela 8: Dados das malhas.....	75
Tabela 15: Valores mínimos e máximos da distância da parede adimensional y^+ e tensão de cisalhamento (Pa).....	99
Tabela 16: Comparativo quantitativo número de potência tanque liso x tanque com janelas.....	103

LISTA DE SÍMBOLOS

B	Largura das chicanas, m
C	Distância entre o fundo do tanque e o impelidor, m
D	Diâmetro do impelidor
F_1	Função de ajuste 1 do modelo SST
F_2	Função de ajuste 2 do modelo SST
g	Aceleração da gravidade , m/s ²
k	Energia cinética turbulenta, m ² /s ²
m	Massa, kg
N	Rotação do impelidor, rotação por segundo
N_p	Número de potência
$N_{p\infty}$	Número de potência para Reynolds infinito (Constante Empírica)
P	Pressão
Re	Número de Reynolds
t	Tempo, s
T	Diâmetro do tanque
u	Velocidade, m/s
u, v, w	Componentes da velocidade no sistema de coordenadas cartesiano, m/s
y^+	Distância adimensional à parede
W	Largura do impelidor, m
Z	Altura do líquido, m

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	22
1.1. Objetivos.....	25
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
2.1. Incrustação Inorgânica	27
2.2. Tanque agitado.....	31
2.2.1. Configuração geométrica do impelidor e do tanque	32
2.2.2. Tipo de agitador.....	35
2.2.3. Números adimensionais	37
2.2.4. Dinâmica de fluidos computacional em tanques agitados	39
2.3. Técnica de gaiola rotativa (rotating cage).....	39
2.3.1. Estudo em gaiola rotativa	43
2.3.2. Uso de cupons para análise de incrustação	53
2.4. Uso de CFD para analisar tanques agitados	57
2.5. Análise do comportamento de adimensionais	59
2.5.1. Efeito do Re sobre o Np	61
2.5.2. Padrão de escoamento.....	65
3. MODELAGEM MATEMÁTICA	68
3.1. Escoamento monofásico	68
3.2. Escoamento Bifásico	68
3.3. Modelo de turbulência	69
3.3.1. Condições iniciais de simulação.....	71
4. ABORDAGEM NUMÉRICA.....	72
4.1. Multiple Reference Frame (MRF)	72
4.2. Solução numérica.....	73
4.3. Discretização dos termos advectivos	73

4.4. Critérios de convergência	74
4.5. Geração da malha	75
4.5.1. Condições de contorno	80
5. METODOLOGIA	83
5.1. Tanque original.....	84
5.2. Matriz de simulações	88
5.3. Delineamento experimental	89
6. RESULTADOS E DISCUSÃO.....	93
6.1. Validação da metodologia numérica: tanque ASTM g170	94
6.2. Validação experimental	95
6.3. Análise CFD tanque ASTM G170 fabricado	95
6.4. Análise da influência das janelas.....	100
6.5. ANÁLISE CFD tanque liso fabricado	104
6.6. Hidrodinâmica do sistema (tanque original).....	108
6.7. Análise experimental para os reatores fabricados.....	111
7. CONCLUSÃO	113
REFERÊNCIAS.....	114

1. INTRODUÇÃO

O consumo mundial de energia de combustíveis fósseis ainda está aumentando, principalmente por causa do crescimento da população global (CHEZEAU et al., 2020). No entanto, recursos de hidrocarbonetos em terra tornaram-se cada vez mais escassos com a exploração contínua das últimas décadas. Ao mesmo tempo, o mar contém vastos recursos de petróleo e gás. Porém, é difícil explorar reservas de petróleo em águas profundas, pois implicam em grandes custos de produção, ambiente hostil, dificuldades na produção e a grande quantidade de energia necessária para o processo (GAO et al., 2020). Dentre os problemas intrínsecos à produção e processamento de petróleo bruto, destaca-se a incrustação, de origem orgânica ou inorgânica, gerada a partir da variação de pressão, composição e temperatura ocasionando a desestabilização e agregação de materiais aderentes na parede da tubulação (ALVES et al., 2019). As incrustações inorgânicas mais comuns são formadas por sulfatos de bário, sulfato de cálcio, sulfato de estrôncio e carbonato de cálcio (ROSA et al., 2015). Esse evento pode causar obstrução parcial ou total e assim bloquear válvulas, tubulações, e em seguida, podem comprometer o escoamento do óleo, gerando perda de produtividade, aumento de reparo e manutenção, proporcionando um significativo custo de produção (REIS et al., 2011).

Esse problema também é encontrado em muitas outras indústrias, como a de alimentos e gás por exemplo (QU et al., 2020).

A incrustação pode ser formada a partir da ocorrência de três fatores simultâneos: supersaturação, nucleação e tempo de contato. A supersaturação é a causa primária da formação de incrustação sendo as alterações de pressão, temperatura, pH, etc., consideradas causas secundárias, pois estes fatores influenciam na solubilidade de um dado composto. Por definição, a nucleação é o

início de um processo de precipitação. E o tempo de contato entre as soluções é fundamental para que ocorra o processo de crescimento do cristal, e uma incrustação possa se formar. (SANTANA; MANZELA, 2017).

Devido à complexidade de analisar a incrustação, alguns trabalhos apresentaram soluções para a mitigação, realizando estudos sobre as superfícies dos materiais. Como por exemplo Tang et al., (2017) e Lv et al., (2018). Em escala de laboratório, o estudo das superfícies utilizando cupons tais como o tanque ASTM G170 tem mostrado ser eficaz, como por exemplo no trabalho de Nichols et al. (2016), Zhang et al. (2017) e Graham et al. (2014).

Cupons são materiais em escala de laboratório, normalmente de forma retangular ou quadrado de mesma espécie (tipo de material) que utilizados na prática, com o objetivo de analisar a incrustação. A Figura 1 abaixo ilustra uma gaiola rotativa com oito cupons e um impelidor não convencional (MQ2021) utilizado neste trabalho e um sistema de tanque agitado por uma gaiola rotativa em escala de laboratório.

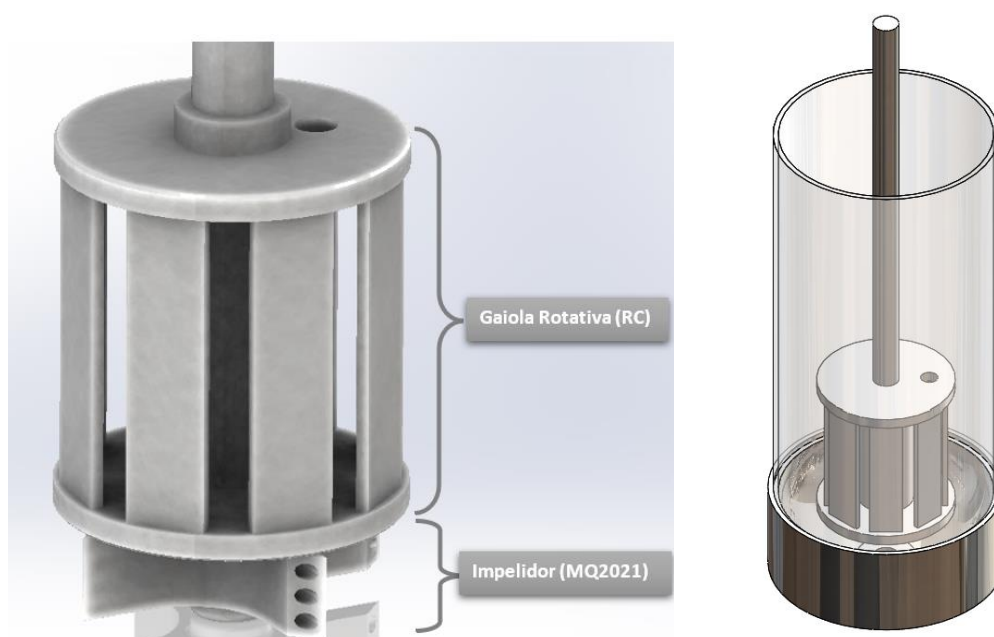


Figura 1: Gaiola rotativa mais impelidor MQ2021 à esquerda e tanque agitado por gaiola rotativa em escala de laboratório à direita desenhados no software Solidworks. Fonte: O Autor

Uma dificuldade para analisar a incrustação em escala de laboratório é trazer as condições reais do ambiente que se forma a incrustação. Porém, as condições podem ser formadas em um tanque agitado, pois o mesmo permite reproduzir e analisar em escala de laboratório os efeitos encontrados na linha de produção com um nível de controle do escoamento máximo.

Nas indústrias de tratamento químico, mineral e de águas residuais, os tanques agitados mecanicamente são amplamente utilizados para simples mistura de líquidos ou para processos multifásicos mais complexos. Na maioria dos casos, o escoamento em tanques agitados é altamente turbulento.

Para entender os fenômenos complexos que ocorrem nesses tanques, é necessário investigar os campos de escoamento monofásico e bifásico, bem como as características de turbulência. Nos últimos anos, houve esforços contínuos para entender esses escoamentos usando ferramentas sofisticadas de dinâmica de fluidos experimental e computacional. Para isso, têm-se utilizado métodos experimentais avançados como velocimetria por imagem de partículas (PIV) e métodos computacionais utilizando dinâmica de fluidos computacional (CFD).

Contudo, a incrustação mostrou ser um problema operacional que afeta diversos processos nas mais distintas atividades industriais. Por isso, justifica-se o estudo da incrustação em superfícies.

Neste trabalho foi proposto modelar numericamente e experimentalmente uma réplica em acrílico, de um sistema pressurizado que está sendo desenvolvido na Universidade federal do Espírito Santo e assim caracterizar a hidrodinâmica do sistema (CFD), como também realizar medidas óticas (Experimental). O sistema trata-se de um tanque agitado por um impelidor não convencional (MQ2021) e uma gaiola rotativa (RC) com o objetivo de analisar a cinética de incrustação.

1.1. Objetivos

O objetivo deste estudo é caracterizar o escoamento no interior de um reator e suas possíveis consequências na cinética de incrustação. O reator em questão é um tanque agitado sem chicanas com gaiola rotativa e impelidor não convencional em escala de bancada.

Os objetivos deste projeto são:

- a) Analisar a tensão de cisalhamento na parede da gaiola rotativa e o escoamento no interior de um tanque original (com janelas de visualização + RC + MQ2021).
- b) Avaliar a influência das janelas de visualização sobre o escoamento, em um tanque réplica do original, porém, sem janelas.
- c) Investigar o comportamento do escoamento no tanque sem janelas com ausência do impelidor MQ2021, como também a tensão de cisalhamento no RC e as consequências para a cinética de incrustação.
- d) Analisar os parâmetros hidrodinâmicos no interior do tanque da norma ASTM G170, como também a tensão de cisalhamento sobre os cupons para validar o modelo numérico.
- e) Levantar dados experimentais do comportamento da superfície livre em tanques agitados do laboratório de petróleo e gás do PPGEN/UFES.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A metodologia de gaiolas rotativas em tanques agitados vem sendo amplamente estudada, tanto experimentalmente como numericamente. Portanto, este capítulo apresentará como a literatura tem abordado o problema proposto a ser estudado neste trabalho.

Para facilitar o entendimento, o capítulo foi dividido seções nos quais são:

A Seção 2.1 trata da incrustação inorgânica. O tema é relevante para o entendimento da justificativa que proporcionou a realização deste trabalho, o objetivo deste é conceituar o leitor sobre o tema, apresentando os problemas causados pelo mesmo, além de tipos de incrustações e os parâmetros que influenciam a sua formação.

A Seção 2.2 aborda o sistema de agitação nos seus aspectos constitutivos, geométricos e operacionais.

A Seção 2.3 traz informações sobre a técnica de gaiola rotativa e sua aplicação para análise da cinética de incrustação.

A Seção 2.4 traz um apanhado de estudo sobre o uso de CFD para analisar tanques agitados com foco na modelagem.

A Seção 2.5 no qual aborda o comportamento de adimensionais em tanques sem chicanas

2.1. Incrustação Inorgânica

Na indústria de petróleo, a produção de petróleo e gás natural envolve o transporte de fluidos nas fases líquida e gasosa para uma unidade de processamento onde é realizada uma separação de fases. Nos últimos anos, no entanto, as operações de produção de petróleo vêm se expandindo para profundidades cada vez maiores, aumentando ainda mais os custos associados e também fazendo estudos detalhados muito necessários de viabilidade e otimização de equipamentos e processos relacionados ao transporte de fluidos multifásicos nessas condições. (TEIXEIRA et al., 2018)

Durante o processo de formação do petróleo e gás, já alocado nas rochas do reservatório, também ocorre a produção de água denominada água de formação, que apresenta características inerentes à rocha em que está localizada, e sua quantidade dependerá das características dos mecanismos naturais ou artificiais de produção e das características de composição da própria rocha do reservatório. Para manter as condições de pressão na rocha do reservatório, uma operação de injeção de água pode ser realizada nas camadas inferiores da rocha, favorecendo a migração e a coleta do material natural de interesse para os poços. (TEIXEIRA et al., 2018)

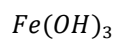
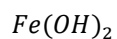
Durante a extração do óleo, também são extraídos água e sedimentos, que se misturam com o óleo, e isso, juntamente com mudanças na pressão, temperatura e escoamento do fluido, pode causar a precipitação desses elementos, formando depósitos. A formação de depósitos de sais inorgânicos, conhecidos na indústria como incrustação ou *scale*, é reconhecida como um dos principais problemas de garantia de escoamento que afetam a produção no setor de petróleo e gás. (DA CUNHA et al., 2016)

Os problemas oriundos da deposição da incrustação nesse setor podem provocar uma série de danos, entre os quais podemos citar a obstrução do poço, no qual afeta a vida útil do equipamento e integridade dos componentes, como válvula de controle de subsuperfície, bombas submersíveis e atuadores hidráulicos. Além disso, as implicações econômicas surgem da redução do escoamento de fluido e, portanto, da menor produção de petróleo, mas também dos enormes custos de manutenção da substituição das linhas de produção.(KAMAL et al., 2018) As incrustações mais comuns ocorrentes em campos petrolíferos com suas respectivas variáveis principais que afetam a solubilidade estão listadas na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1: Tipos de incrustações mais comuns em campos petrolíferos. Fonte: (RIGOBELLO,2013)

<i>Nome</i>	<i>Fórmula Química</i>	<i>Variáveis Primárias</i>
Carbonato de Cálcio (Calcita)	$CaCO_3$	Pressão parcial de CO_2 , temperatura, total de sais dissolvidos pH
Sulfato de Cálcio: Gipsita (mais comum)	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	Temperatura, total de sais dissolvidos, Pressão
Hemidrato	$CaSO_4 \cdot \frac{1}{2} H_2O$	
Anidrato	$CaSO_4$	
Sulfato de Bário	$BaSO_4$	Temperatura, Pressão
Sulfato de estrôncio	$SrSO_4$	Total de sais dissolvidos
Compostos de ferro:		
Carbonato ferroso	$FeCO_3$	Corrosão, Gases dissolvidos, pH
Sulfeto ferroso		
Hidróxido ferroso	FeS	

Hidróxido ferroso



Incrustações inorgânicas (por exemplo, $CaCO_3$, $BaSO_4$ e $SrSO_4$) podem ser depositadas ao longo de todo percurso da água na tubulação. A indústria do petróleo encontra dois tipos de incrustações segundo (VAZIRIAN et al., 2016) da seguinte forma:

- a) Incrustações de carbonato ($CaCO_3$ e $FeCO_3$) ocorrem onde há uma mudança de temperatura e pressão que resulta na liberação de dióxido de carbono da forma aquosa para forma gasosa.



Figura 2: Incrustação inorgânica Carbonato de Cálcio ($CaCO_3$)

- b) Incrustações de sulfato ($BaSO_4$, $SrSO_4$, $CaSO_4$ e $CaSO_4 \cdot H_2O$) ocorrem onde existem mistura de duas salmouras incompatíveis.



Figura 3: Exemplo de incrustações inorgânicas: Sulfato de bário ($BaSO_4$) a esquerda e gipsita ($CaSO_4 \cdot H_2O$) Direita. Fonte: (COSMO,2013)

No início do processo de extração do óleo, devido as grandes diferenças de temperatura e pressão, as incrustações de carbonato são o tipo dominante de formação, enquanto nos últimos estágios da extração do óleo as incrustações de sulfato são os tipos dominantes. O motivo é que no processo de recuperação avançada de petróleo (*Enhanced Oil Recovery* - EOR), a água do mar abundante e barata, é bombeada para o reservatório para aumentar a produção de petróleo. A água do mar é rica em íons de sulfato e reage com cátions (como Ba^{2+} e Sr^{2+}) no reservatório, podendo resultar na formação de incrustações de sulfato (VAZIRIAN et al., 2016).

Portanto, fatores termodinâmicos (pressão, temperatura e pH), mistura de águas quimicamente incompatíveis auxiliam na formação da incrustação. A Tabela 2 abaixo apresenta alguns tipos de incrustações possíveis de se formarem e respectivas condições de formação.

Tabela 2: Principais tipos de deposições e respectivas causas. Fonte: (RIGOBELLO,2013)

<i>Causas da formação de incrustação</i>	<i>Nome químico</i>	<i>Nome mineral</i>
Perda de gases dissolvidos	Carbonato de Cálcio	Calcita, Aragonita
	Hidróxido Ferrítico	Goethita
Solução e gases	Sulfeto Ferroso	Sulfeto de Ferro Amorfo
	Sulfato de bário	Barita
Mistura de águas	Sulfato de estrôncio	Celestita
	Sulfato de cálcio	Calcita
	Carbonato de cálcio	Aragonita
Aquecimento sem evaporação	Carbonato de cálcio	Calcita, aragonita
	Sulfato de cálcio	Gesso, anidrita
	Óxido de ferro misturado	Magnetita
Produtos químicos incompatíveis	Fosfato de cálcio	Hidroxiapatita
	Ferricianeto ferroso	

2.2. Tanque agitado

O escoamento em tanques agitados é o foco deste estudo, por isso, esta seção tem por objetivo compilar informações consolidadas sobre temas relevantes. Inicialmente, é abordado e analisado o sistema de agitação nos seus aspectos constitutivos e geométricos. A seguir, são analisados os tipos de agitadores e seus efeitos sobre o padrão de escoamento. Passa-se, então, a análise dos aspectos teóricos do processo de mistura em tanques agitados. De modo a quantificar características do tanque agitado sem chicanas estudado, serão apresentados e discutidos os números adimensionais relevantes. Finalmente, serão discutidas as técnicas CFD denotando a sua aplicação para modelagem de tanques agitados.

2.2.1. Configuração geométrica do impelidor e do tanque

A hidrodinâmica de um tanque agitado é governado pela interação entre o escoamento e a geometria do tanque (OCHIENG; ONYANGO, 2010). Por exemplo, a suspensão de sólidos depende da forma do fundo do tanque, já a dispersão gás-líquido e líquido-líquido depende da geometria do impelidor e a mistura depende do tamanho relativo entre o tanque e o impelidor (GARCÍA-CORTÉS; JÁUREGUI-HAZA, 2006)

Existe uma grande diversidade de configurações geométricas possíveis a serem implementadas em vasos do tipo tanque agitado, levando em consideração que a geometria ideal do vaso para implementar um processo específico depende do processo a ser realizado (GARCÍA-CORTÉS; JÁUREGUI-HAZA, 2006). Segundo Jakobsen (2008), não existe um projeto de tanque único, ou um ideal para cada processo, pois, vários projetos podem satisfazer processos diferentes. Então, para reduzir custos as empresas adotam um tanque padrão que é caracterizado pelo diâmetro, T , altura do líquido H , diâmetro do impelidor D , largura da lâmina do impelidor W , e altura do fundo do tanque C , conforme a Figura 4 abaixo.

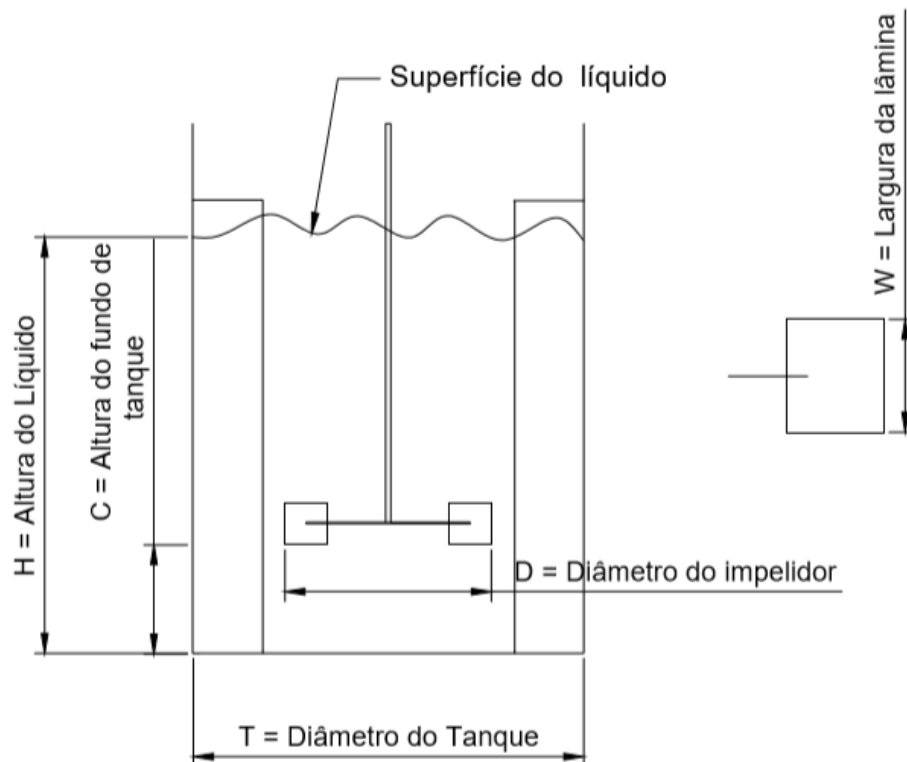


Figura 4: Tanque padrão. Fonte: Adaptado (Jacobsen,2008)

E ainda determina as relações das dimensões padrão:

→ D/T ∴ 1/4 até 1/2

→ C/T ∴ 1/6 até 1/2

→ H/T ∴ 1

→ W/D ∴ 1/4 até 1/6

A característica do escoamento gerado em um tanque depende do tipo do impelidor. Existem três tipos, o axial, radial e misto. Na Figura 5 é possível identificar um impelidor de característica radial. Segundo Spogis (2002), os impelidores do tipo radial são aqueles no qual a maior parte do escoamento gerado tende a ser perpendicular ao eixo do impelidor, ou seja, tendem a impulsionar a massa líquida contra as paredes do tanque. Dentre os impelidores do tipo radial podemos citar como

exemplo as turbinas Rushton, Smith, as turbinas tipo ponta de lança e os impelidores de pás retas.

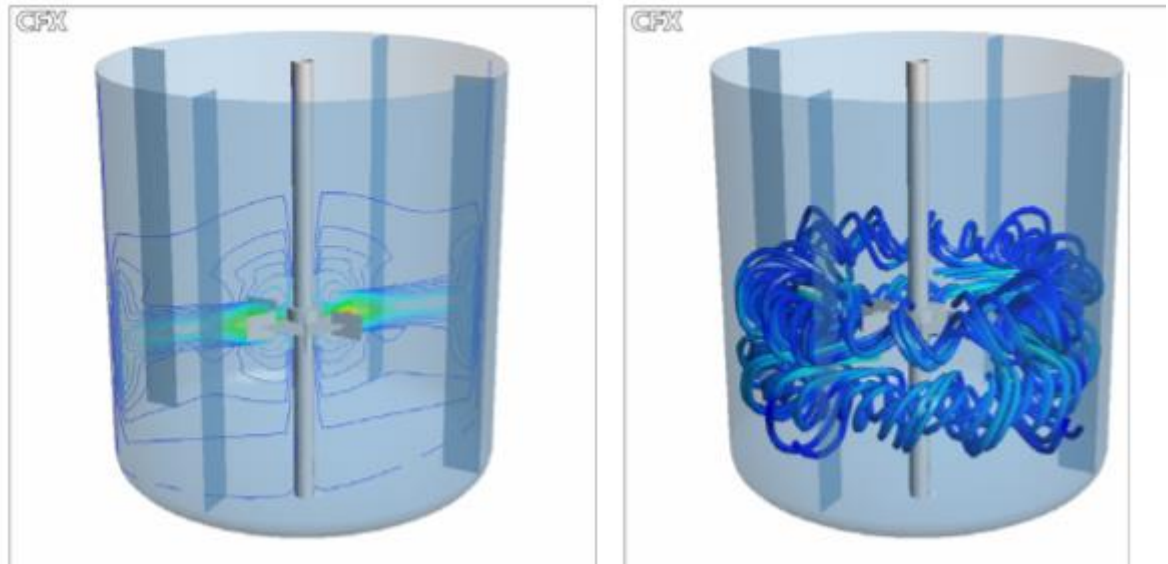


Figura 5: Exemplo do escoamento e vórtices gerado por impelidores do tipo radial. Fonte: (SPOGIS, 2002)

Outra característica importante para agitadores mecânicos são os tipos de tanque. Existe dois tipos de tanques, os que possuem chicanas na parede com o objetivo de converter o escoamento radial e circunferencial em axial, melhorando assim a mistura, e os tanques sem chicanas, que são considerados misturadores menos eficazes, e seu uso se limita nos casos em que as chicanas podem ter efeitos indesejados como por exemplo aplicações de baixo número de Reynolds nas quais as chicanas podem promover a formação de zonas estagnadas (Zonas mortas) (TAMBURINI et al., 2018). Porém, em estudos realizados nos últimos anos mostraram que tanques agitados sem chicanas apresentam vantagens como no tempo de mistura conforme observado por Busciglio *et al.*, 2014. Além disso, os tanques sem chicanas são aconselháveis em processos onde ocorre cristalização (BUSCIGLIO et al., 2014).

2.2.2. Tipo de agitador

Existem muitos tipos de agitadores apropriados para operações de agitação específicas e sistemas de materiais específicos. Nesta seção, serão discutidos apenas os tipos de agitadores que são amplamente utilizados na indústria química, conforme Figura 6.

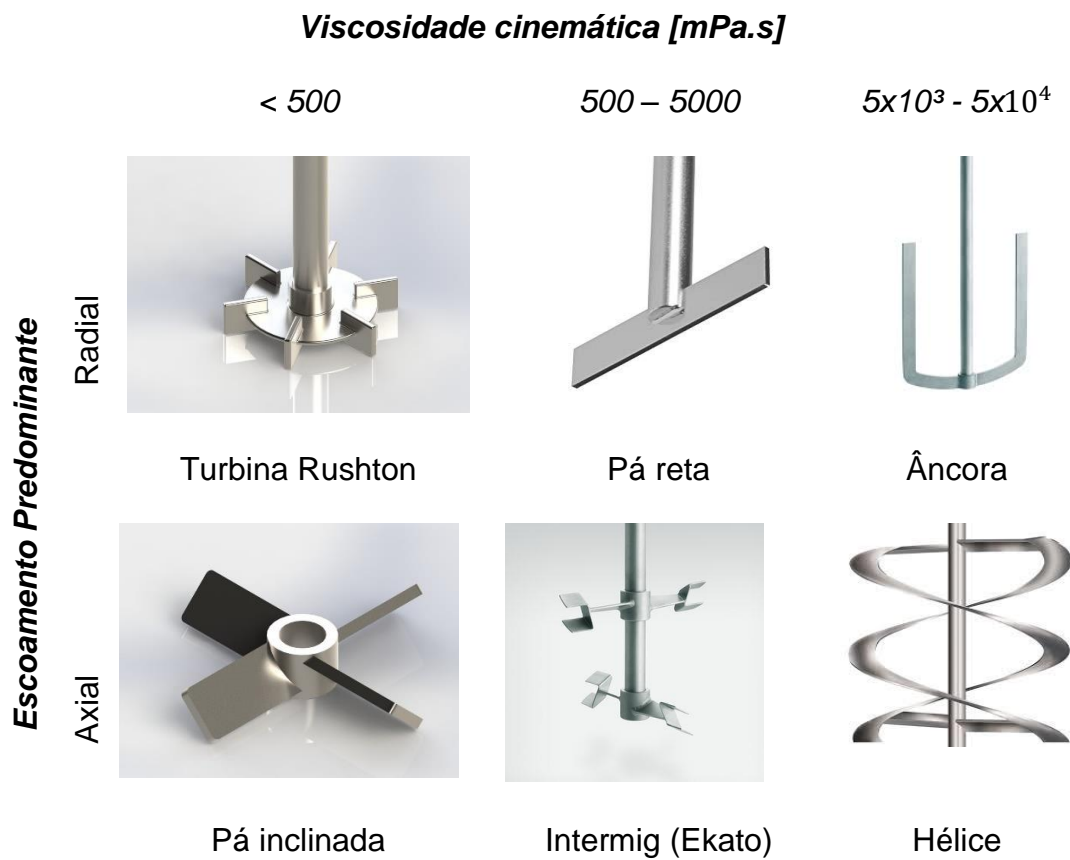


Figura 6: Classificação dos agitadores de acordo com o padrão de escoamento predominante que eles produzem e com a faixa de viscosidades nas quais eles podem ser efetivamente usados. Fonte: Adaptado de (ZLOKAMIK, MARKO, 2001)

Em aplicações práticas, os agitadores convencionais existentes podem geralmente ser divididos em três tipos: agitadores de movimento radial, movimento axial e movimento misto. Para um *design* eficiente do impelidor, o cisalhamento gerado e a energia dissipada (Energia cinética turbulenta) pelo sistema devem ser

bem distribuídos no tanque (PAN et al., 2018). Em contraste com essa regra, alguns agitadores tradicionais produzem algumas desvantagens: o agitador de Turbina Rushton produz dois vórtices conforme a Figura 7-B , que ficam acima e abaixo do disco do agitador (MONTANTE et al., 2001). Esses vórtices dificultam a troca de massa. Já o impelidor tipo Pá inclinada (*Pitched Blade*) produz um único vórtice, porém a troca de escoamento axial e radial em todo tanque é ineficiente (PAN et al., 2018).

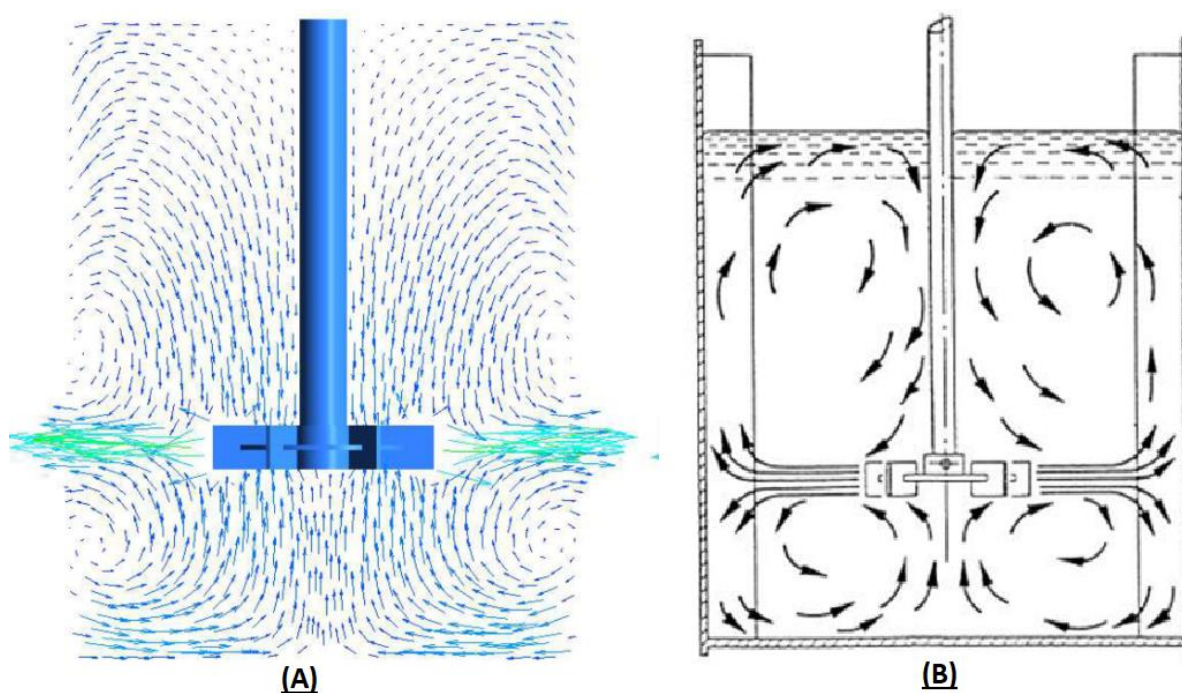


Figura 7: Representação dos vórtices para Turbina Rushton. (A) vetor velocidade (B) Desenho esquemático dos vórtices. Fonte: Adaptado de (SU et al., 2018) e (COKER,2007)

Comparado com a turbina Rushton o agitador *long-short blades* (LSB) possui ótima transferência de massa gás-líquido em processo de aeração (LUO et al. 2016). O agitador LSB gera dois vórtices radiais sob as seis lâminas curtas, e o impacto dos dois vórtices gera um forte escoamento na direção axial no centro, no qual interage com o radial e produz vórtices múltiplos como mostrado na Figura 8. Essa

característica de interação entre o radial e o axial auxilia na eficiência da troca de massa (PAN et al., 2018)

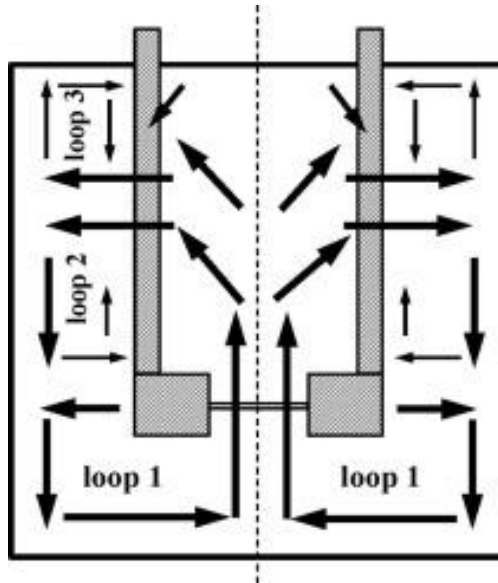


Figura 8: Esboço do padrão de escoamento no tanque agitado com o agitador LSB Fonte:(PAN et al., 2018)

2.2.3. Números adimensionais

Número de Reynolds

A análise do regime de escoamento dentro de um vaso agitado pode ser realizada através do número de Reynolds (R_e). Para um vaso agitado mecanicamente, é proposta na literatura a seguinte expressão: (BARTELS et al., 2002)

$$R_e = \frac{ND^2\rho}{\mu} \quad (\text{Eq.1})$$

Onde N é a velocidade de rotação do impelidor, D é o diâmetro do impelidor, ρ é a massa específica e μ é a viscosidade dinâmica.

Número de Potência e Número de Bombeio

O desempenho global de diferentes impelidores pode ser analisado comparando-se o número de potência (P_o) e o número de bombeio (N_b), que são uma função do tipo de impelidor (geometria) e número de Reynolds. Assim, uma comparação da razão $\frac{P_o}{N_b}$ ou $\frac{N_b}{P_o}$ pode ser uma boa estratégia para avaliar a eficiência ou eficácia de um impelidor para uma determinada potência injetada para maximizar o seu bombeamento. (GÓMEZ, RUBEN RAMIREZ; ALONSO, ALEJANDRO; GONZALEZ, MARGARITA M., 2015)

O número de potência P_o é a potência transferida do impelidor para o fluido, e pode ser calculado pelo torque gerado na parte rotativa (por exemplo, no eixo e no impelidor). Em outras palavras, é a força aplicada ao agitador dividido pela força inercial, calculado como (PAN et al., 2018):

$$P_o = \frac{P}{\rho N^3 D^5} = \frac{2\pi M}{\rho N^2 D^5} \quad (\text{Eq.2})$$

Onde M é o torque, ρ é a densidade do fluido, N é a velocidade de rotação do impulsor e D é o diâmetro do impulsor.

A potência fornecida P é dada por:

$$P = 2\pi NM \quad (\text{Eq.3})$$

Já o número de bombeio mede a capacidade de bombeamento do conjunto é calculado através da Eq. 6 (JESÚS, GASTON MARTINEZ et al., 2017):

$$N_b = \frac{Q}{ND^3} \quad (\text{Eq.4})$$

No qual Q é a vazão volumétrica efetiva promovida pelo impelidor atravessa a superfície lateral de cilindro imaginário posicionado em torno do impelidor, N é a velocidade do impelidor e D é o diâmetro do impelidor, pode ser indicada no domínio do impelidor indicado por rotativo na Figura 9.

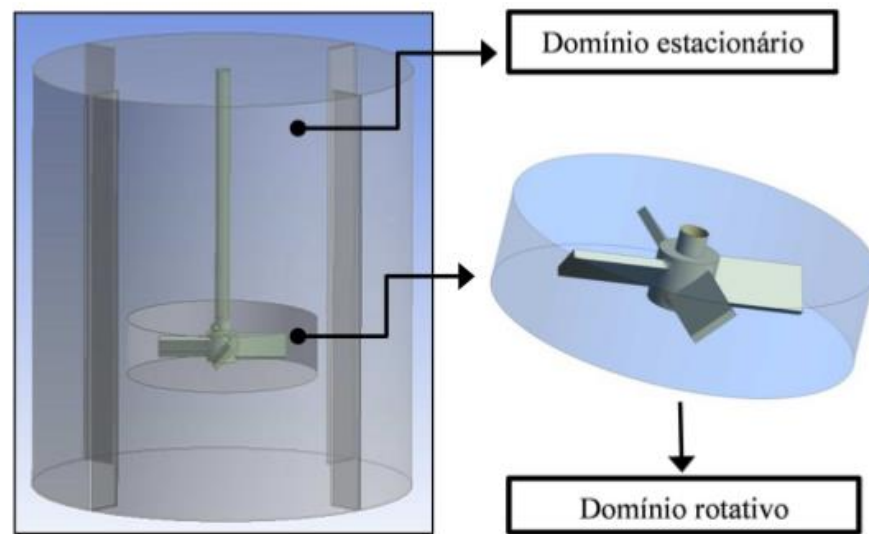


Figura 9: Domínio estacionário e rotativo na geometria. Fonte: (VEGEL,2013)

2.2.4. Dinâmica de fluidos computacional em tanques agitados

A dinâmica dos fluidos computacional (CFD) foi estabelecida com base na dinâmica dos fluidos, método de cálculo numérico e tecnologia computacional (DEGLON; MEYER, 2006). Na literatura, o CFD foi amplamente adotado como um método eficaz para prever característica do escoamento em um tanque agitado. Com o método CFD, é possível reduzir a dependência da pesquisa hidrodinâmica sobre o experimento, a fim de melhorar a eficiência e reduzir o custo (ZHU et al., 2020). A tecnologia CFD incluem a simulação numérica direta (DNS), a simulação por grandes escalas (LES) e as equações de Navier-Stokes médias de Reynolds (RANS). (JOSHI et al., 2017)

2.3. Técnica de gaiola rotativa (rotating cage)

A técnica de gaiola rotativa (RC) é uma metodologia de laboratório para simular condições controladas de operação de escoamentos. Este sistema pode ser utilizado para inúmeros ensaios, sendo muito usado para avaliar a eficiência de inibidores de

corrosão frente a condições agressivas do meio, inclusive em alta pressão e alta temperatura, a norma ASTM G170 cita algumas metodologias válidas como o sistema jato impingimento (JI) e gaiola rotativa (*rotating cage-RC*). O RC apresenta algumas vantagens em relação aos demais métodos: aparato experimental mais simples, geometria mais simples dos corpos de prova e, portanto, de fabricação mais barata, possibilidade de testar vários materiais simultaneamente e sistema facilmente adaptável para realização de testes em altas pressões e temperaturas. A norma ASTM G184 e ASTM G170 apresenta o esquemático de um sistema RC, condições de teste como velocidade de rotação e temperatura que deve ser seguido para alcançar os resultados esperados.

O sistema da gaiola rotativa conta com um controlador do motor, no qual a função é variar a rotação da gaiola rotativa, um motor com um mandril no qual é fixado o eixo sistema rotativo dotado de uma gaiola rotativa (*Rotating Cage*). O sistema ainda conta com dois orifícios de saída e entrada de gás conforme o desenho esquemático da Figura 10 abaixo.

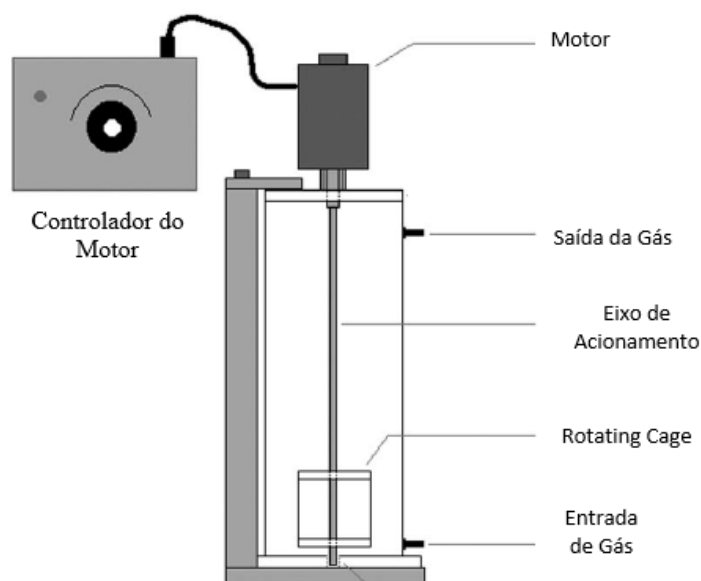


Figura 10: Esquemático do sistema de gaiola rotativa. Fonte: Adaptado de ASTM G184.

O RC é composto por estes cupons que são fixados com o uso de dois discos de TPFE (politetrafluoroetileno). A possibilidade de se utilizar vários corpos de prova em um mesmo ensaio proporciona a vantagem do uso de diferentes ligas metálicas em um mesmo teste. A Figura 11 ilustra este sistema.

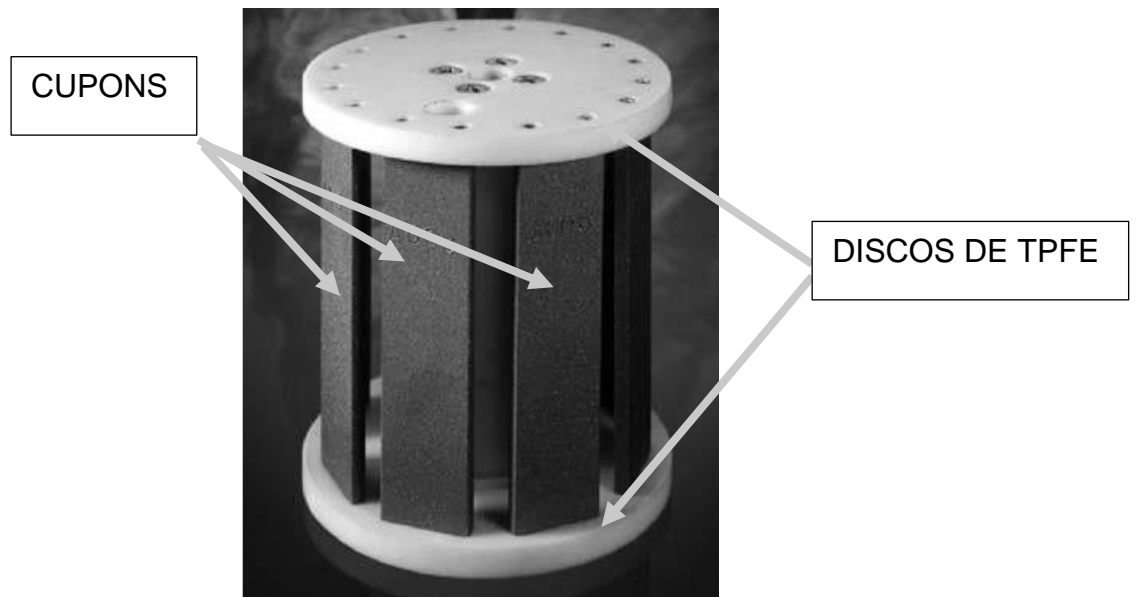


Figura 11: Gaiola rotativa. Fonte: Adaptado de ASTM G184

A rotação do RC pode gerar diferentes padrões de escoamento em função da velocidade, altura do RC em relação ao fundo, formato do tanque e volume de fluido. A norma ASTM G170 classifica esse padrão de escoamento a partir da observação das características do vórtice formado, que pode ser dividido em quatro regimes de

escoamento que a norma nomeia como: zona homogênea, zona afetada pelo topo, zona turbulenta e zona afetada pela parede.

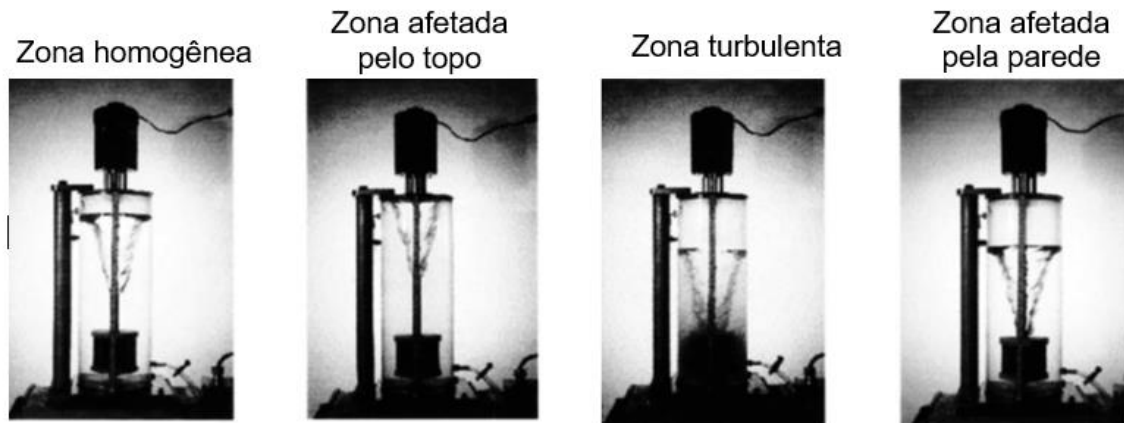


Figura 12: Zonas distintas de escoamento para o sistema de teste do RC. Fonte Adaptado de ASTM G170

A metodologia da RC pode gerar condições rigorosas de escoamento, além disso, como dito anteriormente, esse sistema inclui a realização de ensaios em alta pressão e alta temperatura sendo uma vantagem contra os outros métodos de ensaios em laboratório.

Na literatura observa-se que a zona homogênea é a mais estudada, pois permite através de uma equação estimar a tensão cisalhante (equação 7) que atua na superfície do corpo de prova, desde que a geometria e os parâmetros obedeçam às condições estabelecidas conforme ASTM G170.

$$\tau_{RC} = 0,0791 Re^{-0,3} \rho \omega^{2,3} r_{RC}^2 \quad (\text{Eq.5})$$

→ τ_{RC} : é a tensão de cisalhamento na parede dos cupons provocada pela rotação do Rotating Cage (Pa);

→ Re : é o número de Reynolds do Rotating Cage dado por: $Re = \omega r_{RC}^2 / \nu$;

→ r_{RC} : é o raio do Rotating Cage, ou seja, raio do disco de TPEF.

A tensão de cisalhamento é proporcional ao gradiente de velocidade para fluidos lineares no qual é definida pela Equação 8.

$$\tau = \mu \left(\frac{du}{dy} \right) \quad (\text{Eq.6})$$

Onde τ é a tensão cisalhante total, ν descreve a viscosidade cinemática do fluido, U é a velocidade do fluido e y é a direção perpendicular à superfície.

A tensão de cisalhamento, juntamente com regime de escoamento do fluido tem grande influência na formação de incrustações inorgânicas em sistemas de campos petrolíferos, afetando a nucleação, crescimento, morfologia e adesão (NICHOLS *et al*, 2016). Para encontrar resultados de teste válidos é necessário que as condições aplicadas nos cupons sejam semelhantes às encontradas em campo. Então, para melhor simular estas condições, é necessário o conhecimento da tensão cisalhante que atua na superfície dos corpos de prova no sistema de *Rotating Cage*.

2.3.1. Estudo em gaiola rotativa

Métodos convencionais não representativos das condições existentes em oleodutos têm sido utilizados em experimentos para a incrustação. Estes métodos apresentam baixa turbulência e cisalhamento, que tem particular relevância em sistemas levemente supersaturados, onde as condições hidrodinâmicas podem ter influência na formação de incrustação. Essas considerações tornam-se cada vez mais importantes quando o uso de dispositivos de controle do escoamento, como por exemplo válvulas reguladoras de fluxo, podem resultar em padrões hidrodinâmicos turbulentos e tensões de cisalhamentos extremos (NICHOLS *et al*, 2016).

O RC é um sistema padronizado que permite a investigação do desempenho de inibidores de corrosão e materiais sob uma variedade de condições de testes (RUNSTEDTLER, *et al* 2019). Além disso, também tem sido utilizado para analisar a incrustação. Embora o RC não simula diretamente o escoamento do duto, o método é considerado comparável quando a tensão de cisalhamento do fluido nos cupons de

teste é igual na parede do duto. Sendo este parâmetro objeto de estudo de alguns autores como por exemplo Runstedtler, et al. (2019), que apresentaram uma caracterização paramétrica da tensão de cisalhamento na parede dos cupons para várias condições hidrodinâmicas. O modelo da gaiola utilizada seguiu a norma ASTM e o recipiente de teste tem 150 mm de diâmetro com um volume máximo interno de aproximadamente 8 litros. Porém, foi simulado com 5 litros de líquido com uma pressão atmosférica e para as temperaturas de: 4, 20 e 70°C, e três fluidos diferentes: água, *mixed Sweet blend -MSB* (produto produzido no oeste do Canadá) e *wester canada select- WCS* (é uma mistura convencional e oleosa gerenciada pela Canadian Natural Resources) os dados para os óleos foram obtidos pela www.crudemonitor.ca. O estudo utilizou as velocidades de 350, 500, 850 e 1000 RPM. As simulações numéricas do escoamento de água e óleo leve foram conduzidas no software comercial no ANSYS-CFX® utilizado o modelo de turbulência Shear Stress Transport (SST). Esta escolha objetivou ser possível resolver a camada-limites em todas as superfícies, incluindo a superfície do cupom. Um outro fator importante considerado para o cálculo da tensão, foi o y^+ , pois não seria viável resolver uma camada limite muito fina para escoamentos com altos números de Reynolds, uma vez que a malha computacional precisaria ser extremamente grande. Os valores utilizados de y^+ se encontram na Tabela 3 abaixo, onde é apresentado também seu valor médio em cada caso.

Tabela 3: Distância adimensional da parede ($y+$) para várias condições de escoamento. Fonte: Adaptado de RUNSTEDTLER, *et al* 2019.

ADMENSIONAL $y+$					
LÍQUIDO	TEMPERATURA (°C)	VELOCIDADE DE ROTAÇÃO (rpm)	MÉDIA	MÍNIMO	MÁXIMO
Dilbit	70	1000	0.3	0.019	1.12
Água	20	300	5.5	0.262	10.1
Água	4	300	3.7	0.262	6.90
Água	20	1000	17	2	30
Água	70	1000	37	2.8	72
Light crude	70	1000	10.8	1.64	17

A Tabela 3 mostra que os valores máximos e mínimos de $y+$ variam amplamente, o que significa que o tratamento automático da parede pelo ANSYS é necessário não apenas para uma variedade de casos, mas para os próprios casos individuais. Essa grande variação de $y+$ é resultado do escoamento complexo sobre os cupons. Após ter analisado o $y+$ os autores apresentaram a tensão de cisalhamento na parede dos cupons conforme a Figura 14, que mostrou apenas uma porcentagem da área de superfície do cupom experimentará altas tensões de cisalhamento.

A Figura 13 abaixo trata-se da identificação das partes da gaiola rotativa utilizada nas simulações de RUNSTEDTLER *et al* (2019).

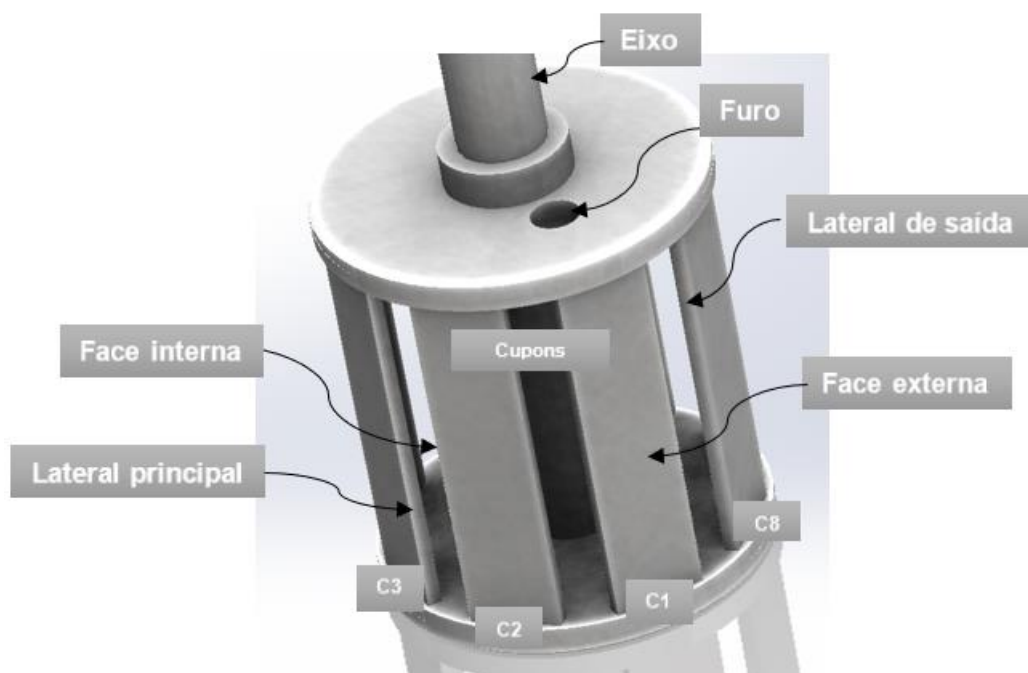


Figura 13: Modelo da gaiola rotativa usado nas simulações com identificação dos cupons. Fonte: O Autor

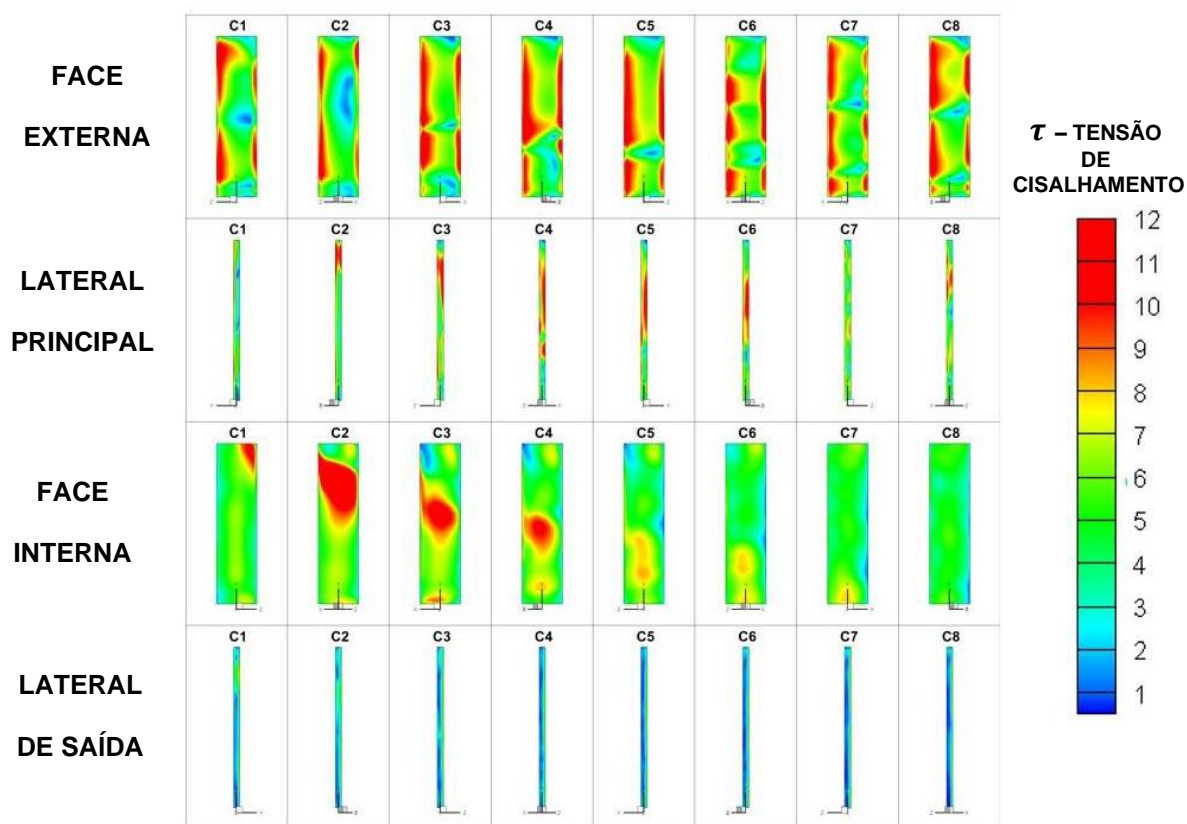


Figura 14: Distribuição da tensão de cisalhamento da parede nas superfícies do cupom para água a 20 graus Celsius e 850 rpm. Fonte: Adaptado de RUNSTEDTLER et al 2019.

No trabalho de Ramachandran (2006), a gaiola rotativa foi simulada em 2 dimensões para vários números de Reynolds e a tensão de cisalhamento foi comparada com os modelos usados atualmente. A Figura 15 apresenta o esquemático do problema simulado, o método numérico utilizado foi o método de vórtice onde as principais equações resolvidas são as de advecção e difusão.

O trabalho apresentou os resultados (Tabela 4) das tensões de cisalhamento simuladas comparadas com a equação de Schmitt e Bakalli (2006) onde a tensão de cisalhamento nos cupons é dada por:

$$\tau = 0,0791 R_e^{-0,3} \rho R_c^2 \Omega^{2,3} \quad (\text{Eq.7})$$

Onde R_e é o número de Reynolds, R_c o raio e Ω é a velocidade angular.

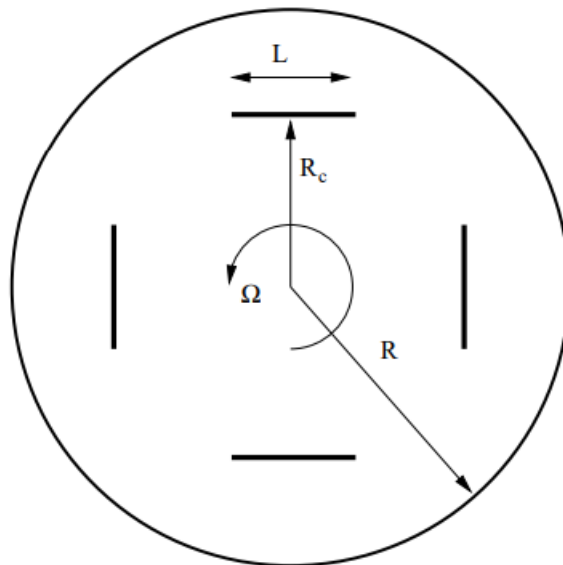


Figura 15: Esquemático da Gaiola rotativa simulada. Fonte: (RAMACHANDRAN, 2006)

Tabela 4: Comparação da tensão de cisalhamento usando a equação de Schmitt e Bakalli e os resultados computacionais. Fonte: Adaptado de (RAMACHANDRAN, 2006).

R_e	τ (Schmitt e Bakalli (2006))	τ Simulado (<i>Externa</i>)	τ Simulado (<i>Interno</i>)
5000	5.79×10^{-5}	2.5×10^{-4}	1.3×10^{-4}
10000	2.31×10^{-4}	1.0×10^{-3}	6.0×10^{-4}
20000	9.26×10^{-4}	2.5×10^{-3}	9.0×10^{-4}
40000	3.70×10^{-3}	8.0×10^{-3}	4.5×10^{-3}

Para os autores, os resultados da Tabela 4 mostram que o escoamento sobre os cupons se aproxima de um escoamento em placa plana, o que explica o grande cisalhamento nas bordas dos cupons. Além disso, os autores informam que a fórmula empírica para a tensão de cisalhamento são estimativas conservadoras.

Hirano *et al* (2018) também avaliou a tensão de cisalhamento juntamente com o efeito da turbulência em gaiolas rotativas, com o objetivo de estudar o comportamento de inibidores de corrosão. Esses parâmetros foram analisados através de CFD e experimentalmente. As especificações do conjunto RC mais tanque apresentaram pequenas alterações comparados com a norma ASTM G170 e ASTM G184. Foram utilizados três tipos de RC, como mostrado na Figura 16 para avaliar a influência da geometria. RC A e B se diferenciam pelos três furos de 12 mm presentes no topo da RC-B. Já a Figura 12-C se trata de um cilindro de PTFE instalado no interior da gaiola A, impedindo o escoamento na parte interna dos cupons.

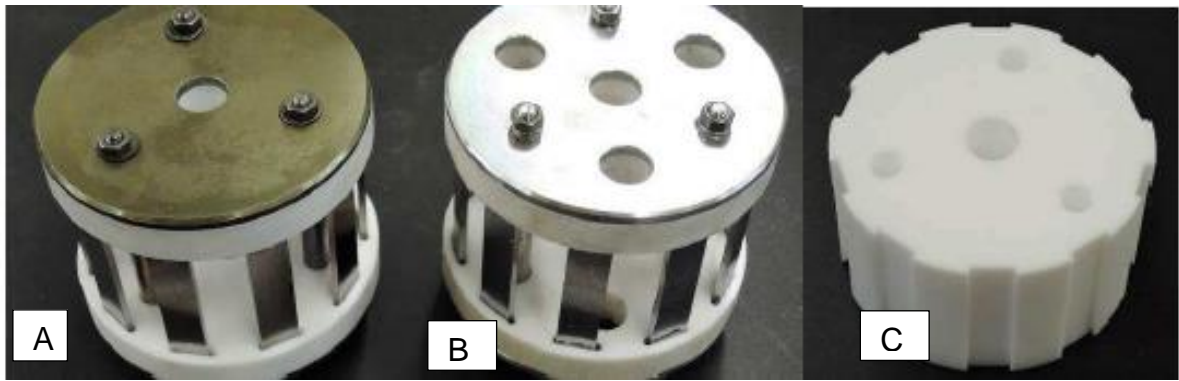


Figura 16: Configuração das gaiolas rotativas. Fonte: Adaptado de (HIRANO et al, 2018)

Os resultados de cada configuração da gaiola são mostrados na Figura 17. É possível concluir que quanto maior a rotação, mais profundo é o vórtice central. Em todos os casos, o fundo do vórtice atinge a parte superior da gaiola e as bolhas de ar são arrastadas para dentro do RC. Além disso, observado a gaiola rotativa A e B na velocidade de 1000 RPM (Figura 17) revelam que os orifícios nos discos de PTFE superior e inferior aumentam a turbulência, visto que a configuração do RC – B apresenta três furos comparado com o RC-A conforme a Figura 16 ilustra. Este parâmetro é descrito na norma ASTM G184.

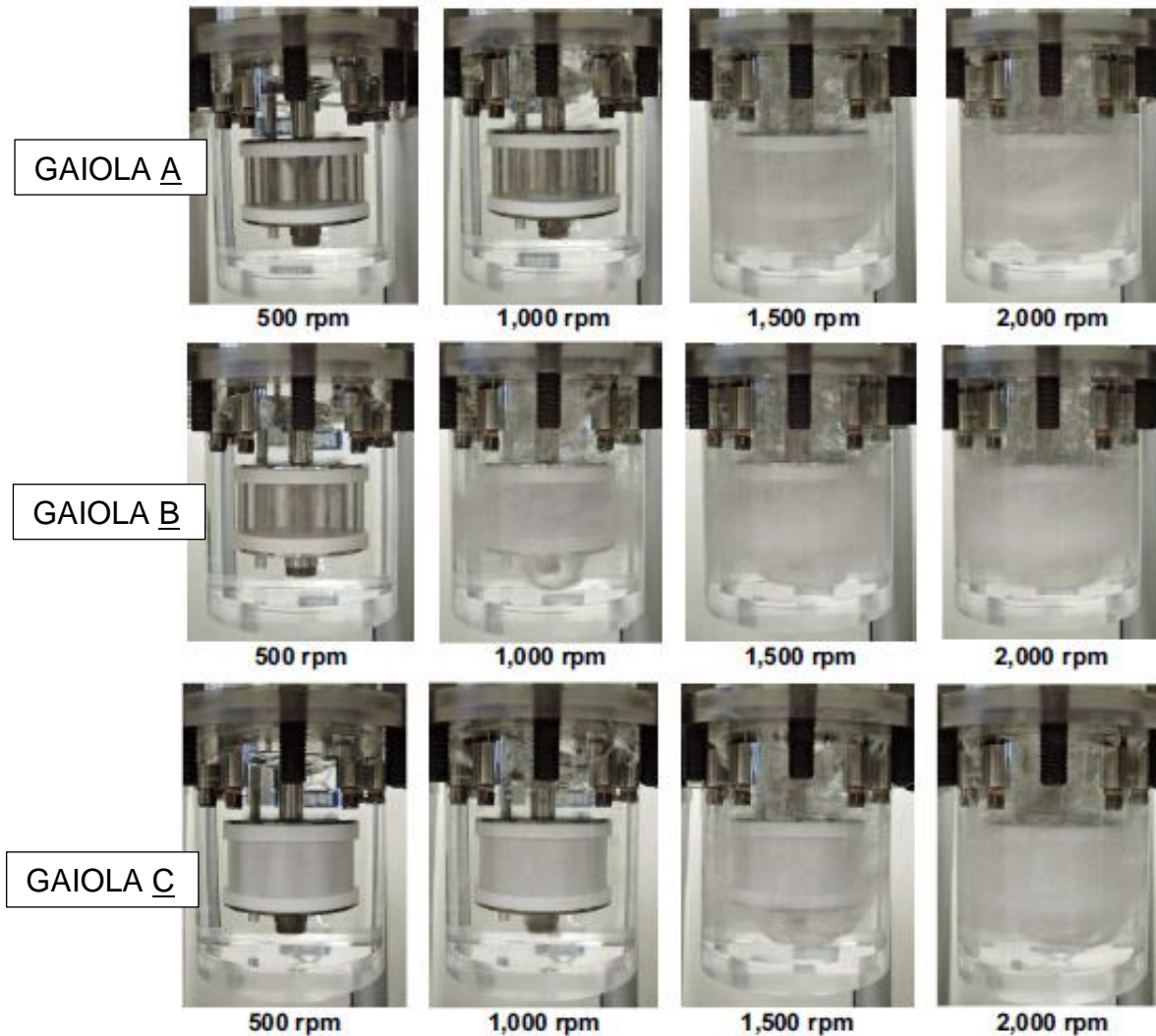


Figura 17: Escoamento sobre os cupons para diferentes configurações do RC e rotação. Fonte: Adaptado de (HIRANO et al, 2018)

Já para a simulação CFD foi analisado tanto o escoamento quanto a tensão de cisalhamento. Foram utilizados parâmetros como escoamento multifásico, sendo a modelagem do escoamento realizada através do *Volume of Fluid (VOF)* e a malha pela técnica de malha deslizante (*Sliding Mesh-SM*), o modelo de turbulência utilizado foi o SST. As simulações mostraram que a 2000 RPM a tensão de cisalhamento máxima na face externa do cupon foi de 170 Pa conforme mostra a Figura 18. Valores baixos da distribuição da tensão de cisalhamento na superfície interna dos cupons não foram mencionadas pelo autor.

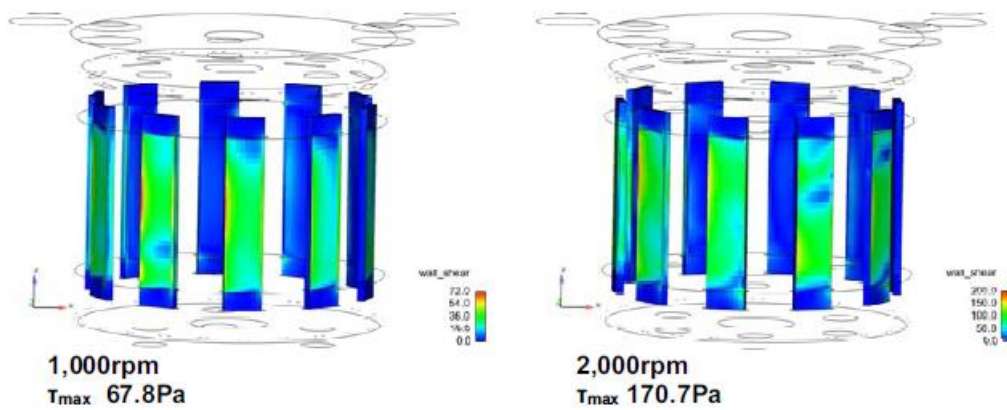


Figura 18: Distribuição da tensão de cisalhamento sobre os cupons. Fonte: (HIRANO et al, 2018)

Vera et al (2017) avaliou a tensão de cisalhamento via CFD e experimental em gaiolas rotativas para diferentes condições de escoamento fazendo uma correlação com a equação de tensão de cisalhamento apresentada pela norma ASTM G170. A abordagem experimental contou com medição de correntes limitantes catódicas em eletrodos de níquel. Os testes foram realizados utilizando água deionizada a temperatura de 28 °C, a temperatura foi determinada com auxílio de um Termopar, já a velocidade de rotação foi verificada utilizando um tacômetro NIST-Traceable. A Figura 19 apresenta a configuração do RC utilizado nos testes experimentais. Já para as simulações CFD foram utilizados o software ANSYS para criar a geometria computacional, gerar as malhas e resolver as equações hidrodinâmicas. A malha utilizada contou com 5,2 milhões de elementos, no qual para as partes rotativas foram utilizados elementos hexaédricos devido à complexidade da geometria, enquanto para a região estacionária foram utilizados elementos tetraédricos, o escoamento multifásico foi utilizado e o modelo de turbulência empregado foi Reynolds *Stress Model* (RSM). A Figura 20 apresenta os detalhes da malha computacional usada.



Figura 19: Configuração RC modificada para testes eletroquímicos. Fonte: Vera et al (2017).

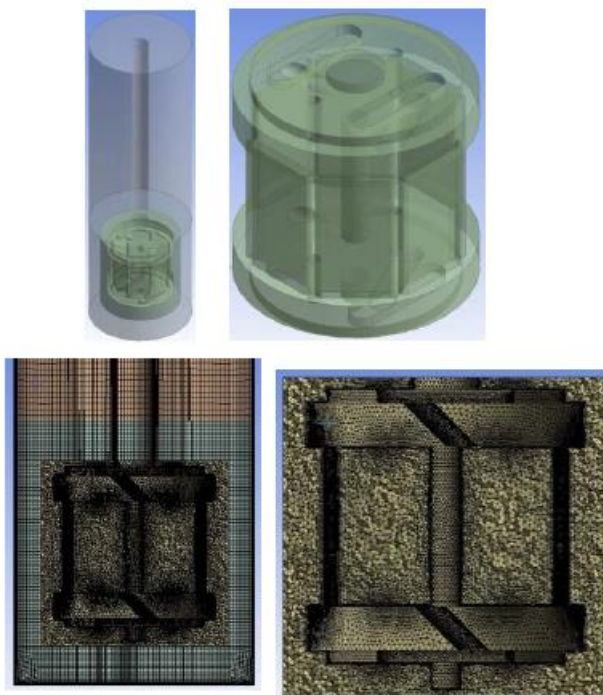


Figura 20: Modelo RC e grade computacional. Fonte: Vera *et al* (2017).

Para validar o modelo CFD utilizado, o autor comparou a análise do vórtice formado para as rotações de 200, 600, 800 e 1200 RPM, CFD com análise experimental, segundo o mesmo, para as diferentes velocidades houve boa concordância com as dimensões. Os resultados tensão de cisalhamento calculados

via experimental e CFD são mostrados nas Tabela 5 e Tabela 6 consecutivamente. O autor ainda exalta a diferença da tensão de cisalhamento apresentada pela equação empírica da norma ASTM G170 e os valores encontrados no estudo, e ainda afirma a necessidade de mais trabalhos para prever uma equação para avaliar a tensão de cisalhamento em gaiolas rotativas.

Tabela 5: Resultado experimental. Fonte: Adaptado de Vera *et al*, (2017.)

RESULTADO EXPERIMENTAL		
VELOCIDADE DE ROTAÇÃO (RPM)	T (°C)	TENSÃO DE CISALHAMENTO MAX. (Pa)
203	28,5	2,63
300	28,5	4,32
401	28,4	6,15
501	28,3	8,16
601	28,1	9,93
700	28	11,99
800	28	15,52
1000	28,1	18,38
1200	28,3	22,79

Tabela 6: Resultado CFD. Fonte: Adaptado de Vera *et al*, (2017).

RESULTADO CFD		
VELOCIDADE DE ROTAÇÃO (RPM)	TENSÃO DE CISALHAMENTO MAX. NA SUPERFÍCIE EXTENA DO CUPON (Pa)	TENSÃO DE CISALHAMENTO MAX. NA SUPERFÍCIE INTERNA DO CUPON (Pa)
200	1,71	0,98
600	16,24	10,23
800	32,06	24,21
1200	62,94	39,73

2.3.2. Uso de cupons para análise de incrustação

A formação de incrustação inorgânica em campos petrolíferos é influenciada pelo escoamento do fluido, tensão de cisalhamento e turbulência, afetando a nucleação, crescimento e adesão. O fato de que métodos convencionais de avaliação

de desempenho de inibidores têm sido testados em condições de baixo cisalhamento, baixa turbulência o que geralmente os torna pouco representativo em condições reais durante a produção. Apesar do crescente reconhecimento dessas questões, observa-se poucos estudos relatados sobre o desenvolvimento de metodologias de teste para avaliação da formação de incrustações sob alto cisalhamento e escoamento turbulento.

Em Nichols *et al.*, (2016) observa-se a abordagem de um cilindro rotativo que geralmente é utilizado para testes de corrosão, para gerar cisalhamento superficial no metal dos cupons. Este método consiste em um pequeno cupom cilíndrico rotativo (Figura 21), imerso em um tanque com um fluido de teste, quando utilizado para avaliar a incrustação é capaz de aumentar a precipitação devido ao cisalhamento da superfície e turbulência assim gerada. No entanto o regime de escoamento no tanque agitado com a gaiola rotativa não é representativo em comparação o que é esperado no campo. A abordagem também é limitada a pressões ambientes.



Figura 21 : Gaiola Rotativa Fonte: (NICHOLS et al.,2016)

No experimento de Nichols *et al.*, (2016) o cilindro rotativo foi testado em uma salmoura da proporção 50-50 de água misturada com água do mar. A água foi

ajustada de modo que todos os três minerais de sulfato (cálcio, estrôncio e bário) tenham um potencial de incrustação leve com o $CaSO_4$ menor do que $SrSO_4$ que por sua vez seja menor que $BaSO_4$, a temperatura de 90 °C. O cilindro rotativo foi avaliado para as tensões de cisalhamento de 10 Pa (2940 RPM), 40 Pa (6640RPM) e 80Pa (9980 RPM). A tensão de cisalhamento foi determinada pela rotação do reator e a concentração de sais foi avaliada com o uso de inibidores de incrustação. O teste durou 48 Horas e as amostragens foram avaliadas nos tempos de 0, 2, 4, 24 e 48 horas. Os resultados (Figura 22) mostraram que apesar da turbulência neste sistema ser maior que outros sistemas utilizados na literatura, o potencial de incrustação de $SrSO_4$ é leve, e necessita de um período de indução de mais de 4 horas antes que a precipitação seja observada. Além disso, foi possível observar que após o início da precipitação, a taxa de precipitação de $SrSO_4$ aumenta com maior cisalhamento e turbulência, porém o autor deixa claro que mais testes são necessários para confirmar tal efeito.

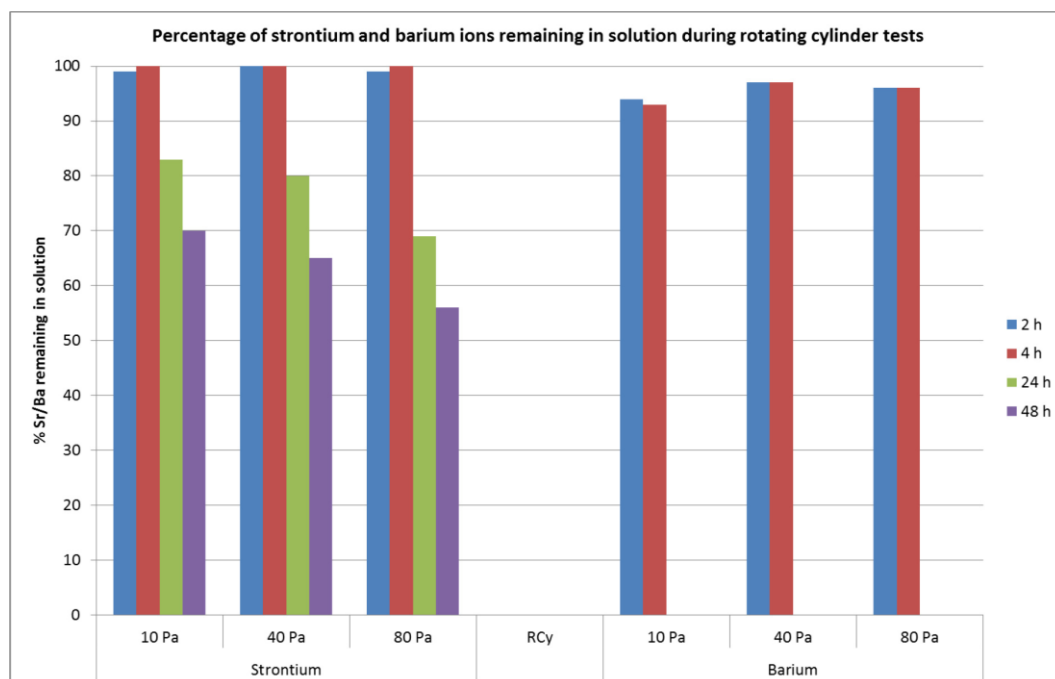


Figura 22: Análises de estrôncio e bário *versus* tempo de testes do cilindro rotativo. Fonte: (NICHOLS et al.,2016)

No trabalho de o Graham et al,2014, o RC também foi utilizado para avaliar o efeito da tensão de cisalhamento na incrustação na superfície de cupons. O RC foi testado em uma salmoura na proporção de 50% água de formação (Sódio, Cálcio, Bário, Estrôncio e cloreto) e 50% água do mar (Sódio, Calcio, Bário, Estrôncio, Sulfato e cloreto) com temperatura de 90 °C e pressão de 1 bar. O cilindro rotativo foi avaliado para as tensões de cisalhamento de 10Pa (2939 RPM), 40Pa (6641RPM) e 80Pa (9984 RPM). O teste durou 48 Horas e as amostragens foram avaliadas nos tempos de 2, 4, 24 e 48 horas. Os resultados (Figura 23) mostraram que para o $BaSO_4$, a incrustação completa foi observada após 24 horas com diferença mínima entre 10Pa e 80 Pa, isto indica que o maior cisalhamento está resultando em uma incrustação mais rápida. Essa mesma situação é observada para o $SrSO_4$.

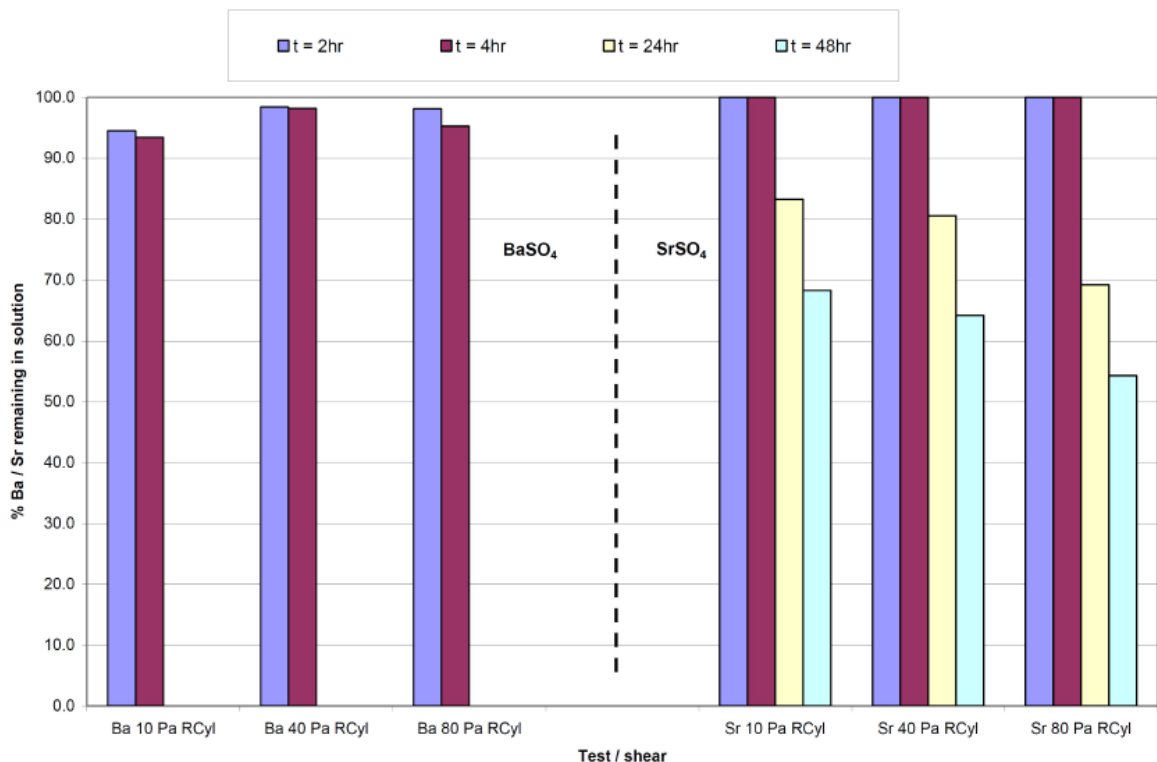


Figura 23: Porcentagem de Ba e Sr em solução durante os testes de cilindro rotativo (RC). Fonte:

(GRAHAM et al,2014)

2.4. Uso de CFD para analisar tanques agitados

Abordagem Numérica - Modelo de Turbulência em tanques Agitados sem chicanas

Li et al. (2020) analisaram um tanque agitado sem chicanas de forma octogonal. A análise do campo de escoamento em estado estacionário abrangeu toda faixa de regimes de escoamento: de Stokes, laminar, transição até o regime turbulento. Para essa abordagem foi utilizado o modelo *Shear Stress Transport* (SST), o domínio do fluido foi discretizado com uma malha de elementos tetraédricos. A qualidade da malha foi analisada utilizando critérios de assimetria, em todo o domínio computacional, a assimetria da malha foi menor que 0,8 e a porcentagem de assimetria da malha variando de 0 a 0,6 foi de 95,1%. O intervalo de tempo é de 0,002 s com 20 interações por passo, quando a velocidade do impelidor é de 4 rotações por segundo. O número de potência transiente foi analisado com base no torque previsto do impelidor. Os resultados mostraram que o número de potência de Plateau Np_{∞} (número de potência calculado imediatamente após o impelidor começar a girar em um fluido inativo ($t=0$), até que o fluido impulsionado pelo impelidor retorne de volta pela primeira vez ($t = t^*$)) é próximo aos dados experimentais da literatura, com erro de 3,57%, já o número de potência no estado estacionário Np_s previsto é maior que o experimental (Figura 24) literatura. Para o tanque agitado sem chicanas em estudo o Np_{∞} é cerca de 4,5 vezes maior que o Np_s . Ou seja, o consumo de energia no estágio inicial é muito maior do que no estágio de estado estacionário em um tanque agitado sem chicanas.

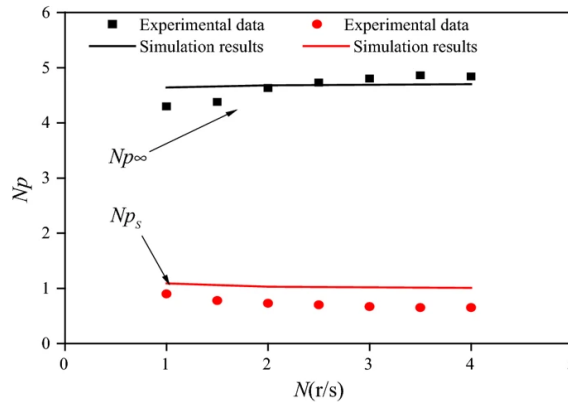


Figura 24: Comparação dos números de potência previstos com dados experimentais na literatura.
Fonte: (LI et al., 2020)

Trad et al. (2017) investigaram a hidrodinâmica e a mistura através da técnica de CFD em um tanque agitado sem chicanas para nove projetos de impelidores, com o objetivo de identificar o melhor. O CFD foi utilizado para simular nove configurações do agitador. Assim, o escoamento monofásico foi analisado em função da velocidade de rotação usando um pacote de software Phoenics® da CHAM Ltd. (Reino Unido) através do modelo $k - \varepsilon$. Foi utilizada uma malha cartesiana, com 300.000 elementos. A condição de contorno definida foi *no-slip* (sem escorregamento) na parede do tanque, enquanto a interface gás-líquido foi definida como *solid-wall with slip* (parede sólida com deslizamento permitido). O fluido estava inicialmente em repouso, o passo de tempo foi de 0,01 s e os resultados convergiram quando os resíduos fossem inferiores a 10^{-3} . O resultado mostrou que o modelo conseguiu prever dados próximos às técnicas PIV e PLIF com sucesso, podendo assim definir a melhor configuração para o tanque agitado.

2.5. Análise do comportamento de dimensionais

Número de bombeio

Martínez et al. (2017) estudaram através da técnica CFD a hidrodinâmica em um tanque sem chicanas agitado com um impelidor radial do tipo “NR” (patenteado por Steinmetz, 1993) a $20 \leq Re \leq 133$, com dimensões de ranhura de 1,5 mm (NR-1,5) (e para 3,0 mm (NR-3,0mm) (Figura 25A). O tema mais importante abordado neste trabalho é o efeito do tamanho da ranhura no desempenho hidrodinâmico de dois impelidores do tipo NR (NR-1,5 e NR-3,0). Sendo assim, o estudo fornece uma compreensão mais profunda do campo hidrodinâmicos induzido por esses impelidores e compara seu desempenho com os dados experimentais de Gómez et al. 2020 existentes de impelidores de alto cisalhamento (*High Shear Impellers - HSIs*) como o Hockmeyer D com dois (HockD - 2R) e quatro anéis (HockD - 4R), respectivamente, operando no mesmo regime de escoamento. Os resultados mostraram que para ambos os impelidores, o número de bombeio aumentou com o aumento do número de Reynolds. No entanto, o impelidor NR-3,0 exibe o número de bombeio efetivo mais alto no regime de vazão considerado comparado com a literatura (ou seja, teria baixo custo operacional). A Figura 26 apresenta estes resultados.

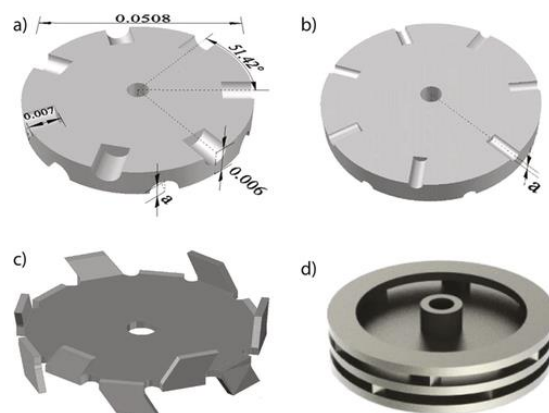


Figura 25: Imagem dos impelidores (a) NR-3,0, $a = 0,003$ m; (b), NR - 1,5, $a = 0,0015$ m; (c) Impelidor dente de serra (d) Hockmeyer-D. Fonte: (MARTÍNEZ et al. 2017)

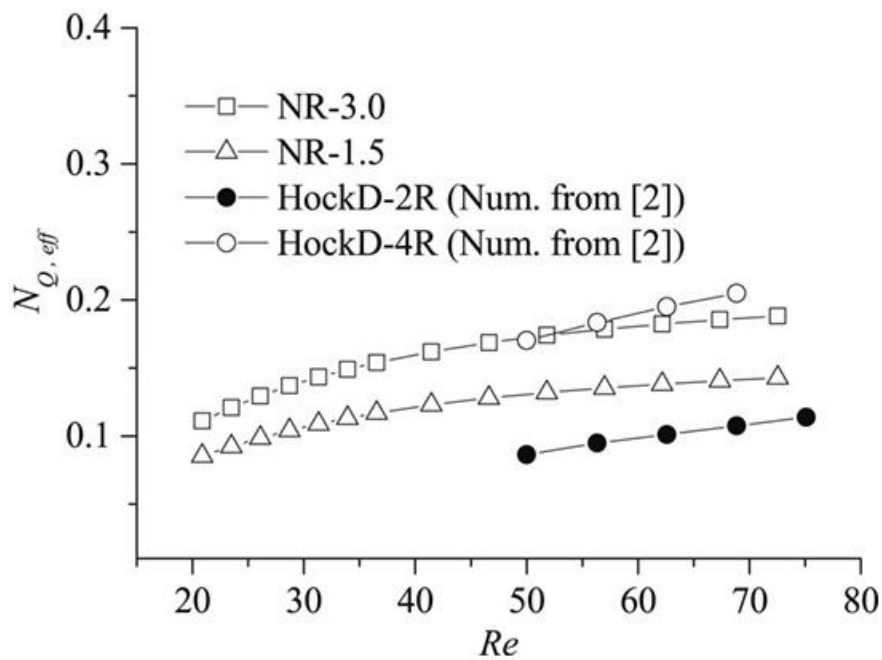


Figura 26: Valores do número de bombeamento dos impelidores NR-3,0 e NR1,5 comparados com os HSis(HockD - 2R eHockD - 4R).Fonte: (MARTINEZ et al. 2017)

Tamburini et al. (2018) analisaram através da técnica CFD com abordagem DNS (*Direct Numerical Simulations*) dois vasos agitados (Figura 27) por uma turbina Rushton de seis lâminas, cobrindo toda faixa de escoamento (de laminar a turbulento), para o número de Reynolds entre 0,2 e 600. Os resultados (Figura 28) mostraram que para o baixo número de Reynolds (0,2 ~ 1) o número de bombeio é idêntico para vasos com defletores e sem defletores. A região de Re entre 1~ 100 é caracterizado pelo aumento do N_b e ambos os vasos tende a um valor de 0,6. A última região ($Re > 100$) é caracterizado pela divergência dos valores para os vasos com e sem defletores, onde os vasos com defletores possuem os maiores valores. As linhas tracejadas mostram os valores obtidos na literatura para tanques agitados com chicanas e sem chicanas para Reynolds maior que 10.000. Portanto, a partir da região de transição começa aparecer uma bifurcação nos valores do número de bombeio, com os tanques

sem chicanas apresentando menor número de bombeio a partir de Reynolds igual a 100 até a região turbulenta.

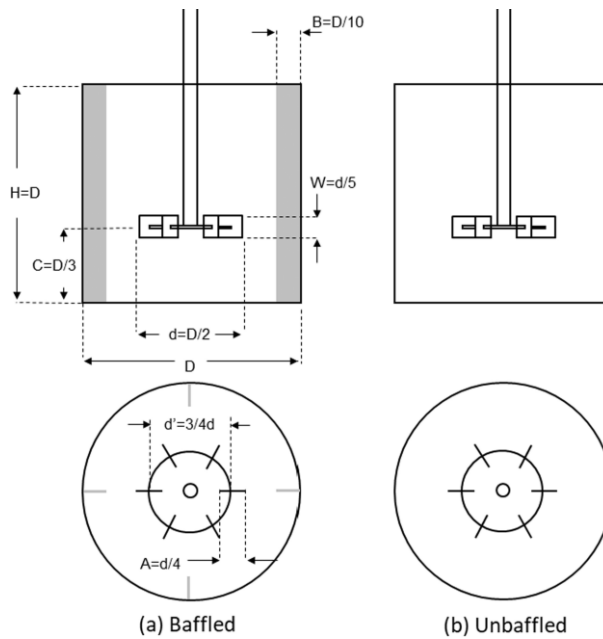


Figura 27: Sistemas sob investigação. Fonte: ((TAMBURINI et al., 2018)

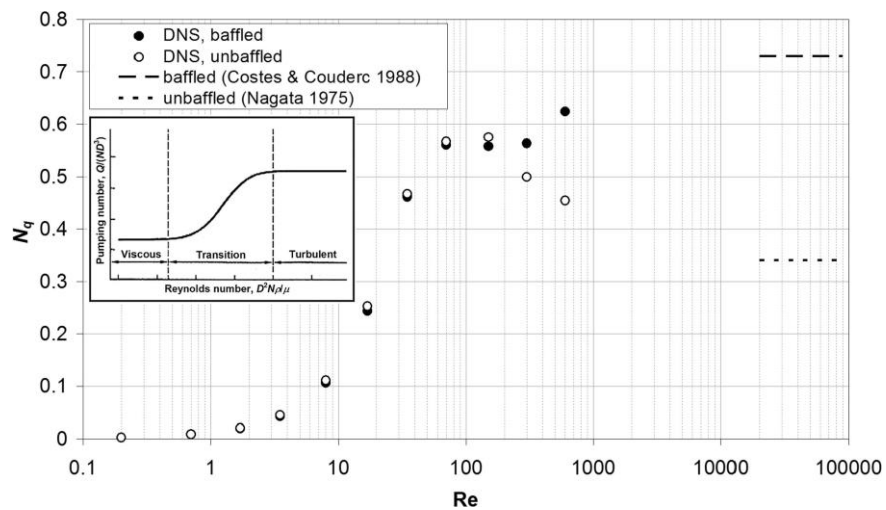


Figura 28: Os resultados computacionais atuais para o número de bombeio em vasos com chicanas e sem chicanas para o número de Reynolds entre 0,2 e 600. Fonte: (TAMBURINI et al., 2018)

2.5.1. Efeito do Re sobre o N_p

O número de Potência é um dos parâmetros mais amplamente utilizados como especificação de projeto em operações de mistura e este fornece estimativas seguras em

inúmeros resultados de processos. Vários parâmetros influenciam o número de Potência (N_p), como por exemplo: a presença ou ausência das chicanas, distância do impelidor em relação ao fundo do tanque e diâmetro do tanque. (SOPHIA,2010) Diversos autores estudaram este adimensional em tanques agitados sem chicanas (objeto de estudo neste trabalho) como por exemplo: *Martínez et al.* (2017) estudou a hidrodinâmica em um tanque sem chicanas agitado com um impelidor radial do tipo “NR” (patenteado por Steinmetz,1993) a $20 \leq Re \leq 133$ com dimensões de ranhura de 1,5 mm (NR-1,5) e para 3,0, mm (NR-3,0mm), neste estudo foi utilizado 2099 rpm e $Re = 128$ para o NR- 3,0 e 2177 rpm e $Re = 133$ para o NR-1,5. Foi utilizado os dados numéricos e comparados com a literatura. Os resultados (Figura 29) mostraram que para ambos os impelidores houve uma redução do número de potência com o aumento de Reynolds, porém o impelidor NR-3,0 exibe um número de potência mais baixo e número de bombeio mais alto o que torna o seu desempenho melhor.

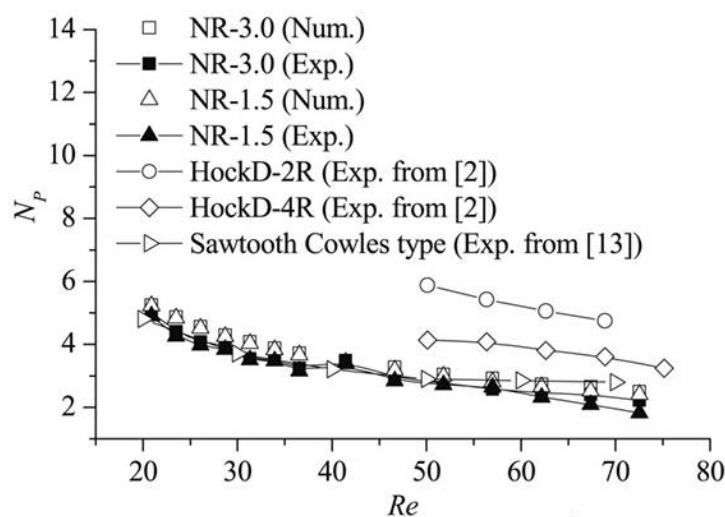


Figura 29: Comparação entre valores experimentais relatados na literatura e numéricos do número de potência com base no torque. Fonte: (MARTÍNEZ et al. 2017)

(LI; XU, 2017) analisaram o escoamento turbulento com vórtice de superfície livre em um tanque agitado sem chicanas com turbina Rushton (Figura 30) através do

CFD. A confiabilidade e a precisão das simulações são verificadas comparando os perfis de superfície livre previstos e os números de potência com os dados experimentais da literatura. Descobriram que o número de potência em regime turbulento para tanques com chicana é de 4,72 e para tanques sem chicana é de 1,24. Ambos os valores se mostraram próximos da literatura analisada pelos autores conforme Tabela 7. Os autores concluíram que mantendo a velocidade e aumentando o diâmetro do impelidor, o vórtice de superfície livre se torna maior. *Clearance* representado pela letra C na imagem abaixo, não tem influência significativa na forma do vórtice. O número de potência diminui com o aumento do número de Reynolds, e são mais baixos que os tanques agitados com chicanas.

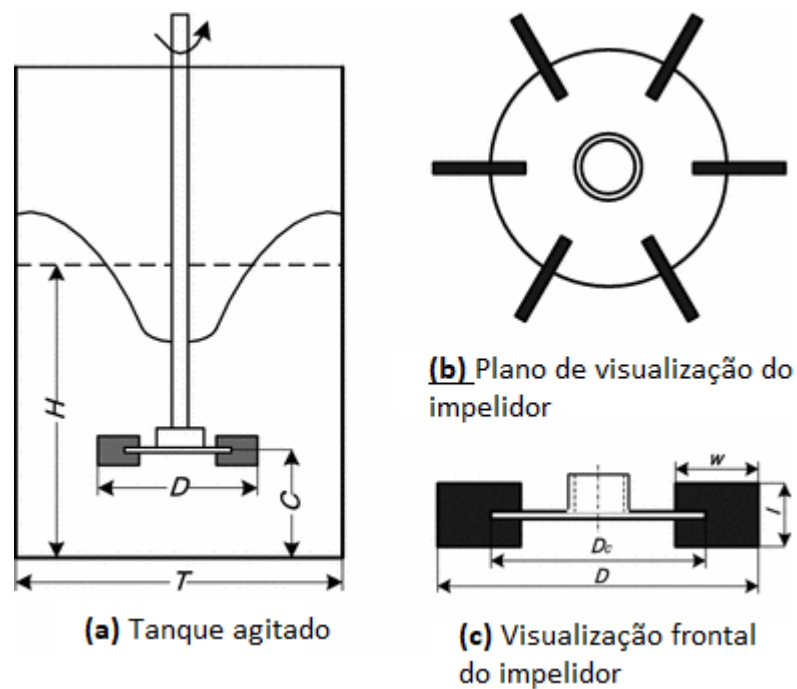


Figura 30: Desenho do tanque agitado e turbina Rushton investigado. Fonte: Adaptado de (LI; XU, 2017)

Tabela 7: Comparação do número de potência para tanques agitados com e sem chicanas. Fonte: O Autor.

Literatura	Parâmetros Geométricos	N_p
Li e Xu (2017) sem chicanas	$H=T, C/T=0.33, D/T=0,33, w_b / T = 0$	1.24

Li e Xu (2017) com chicanas	$H=T, C/T=0.33, D/T=0,33, w_b / T = 0,1$	4.72
Scargiali et al. (2013)	$H=T, C/T=0.33, D/T=0,33, w_b / T = 0$	0.95
Rutherford et al. (1996)	$H=T, C/T=0.33, D/T=0,33, w_b / T = 0,1$	4.9
Wadnerkar et al. (2012)	$H=T, C/T=0.33, D/T=0,33, w_b / T = 0,1$	4.97

(TAMBURINI et al., 2018) analisaram através da técnica CFD com abordagem DNS (*Direct Numerical Simulations*) dois vasos agitados por uma turbina Rushton de seis lâminas, cobrindo toda faixa de escoamento (de laminar a turbulento), para o número de Reynolds entre 0,2 e 600. Os resultados (Figura 31) mostraram que para Reynolds muito baixo (até 10) o valor de P_0 varia com Re^{-1} , para a região ($10 < Re < 100$) P_0 deixa de variar com Re^{-1} , os valores dos vasos agitados com e sem defletores ainda são bem próximos. Para a região onde $Re > 100$ há uma divergência dos valores e os tanques sem defletores apresentam os menores valores de P_0 .

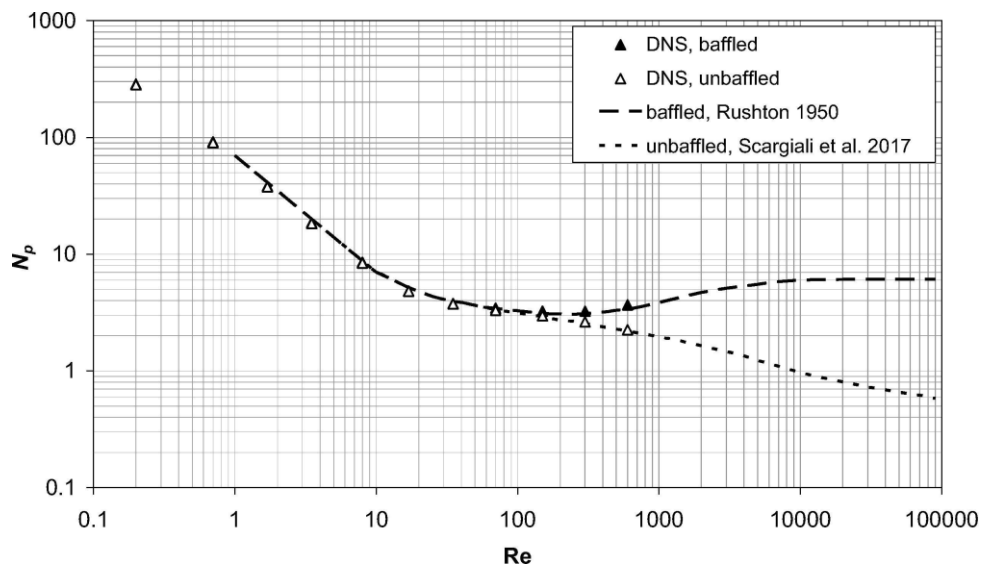


Figura 31: O número de potência para tanques com e sem chicanas para o número de Reynolds variando de 0,2 a 10^5 . Fonte: (TAMBURINI et al., 2018)

2.5.2. Padrão de escoamento

(LI; XU, 2017) analisaram um tanque com e sem chicanas agitado por uma turbina Rushton. E verificou que o padrão de escoamento de um tanque sem chicanas é formado por dois *loops* padrões e também que a circulação do fluido é considerada fraca. Para o tanque com chicanas observou que o escoamento é radial (Figura 32).

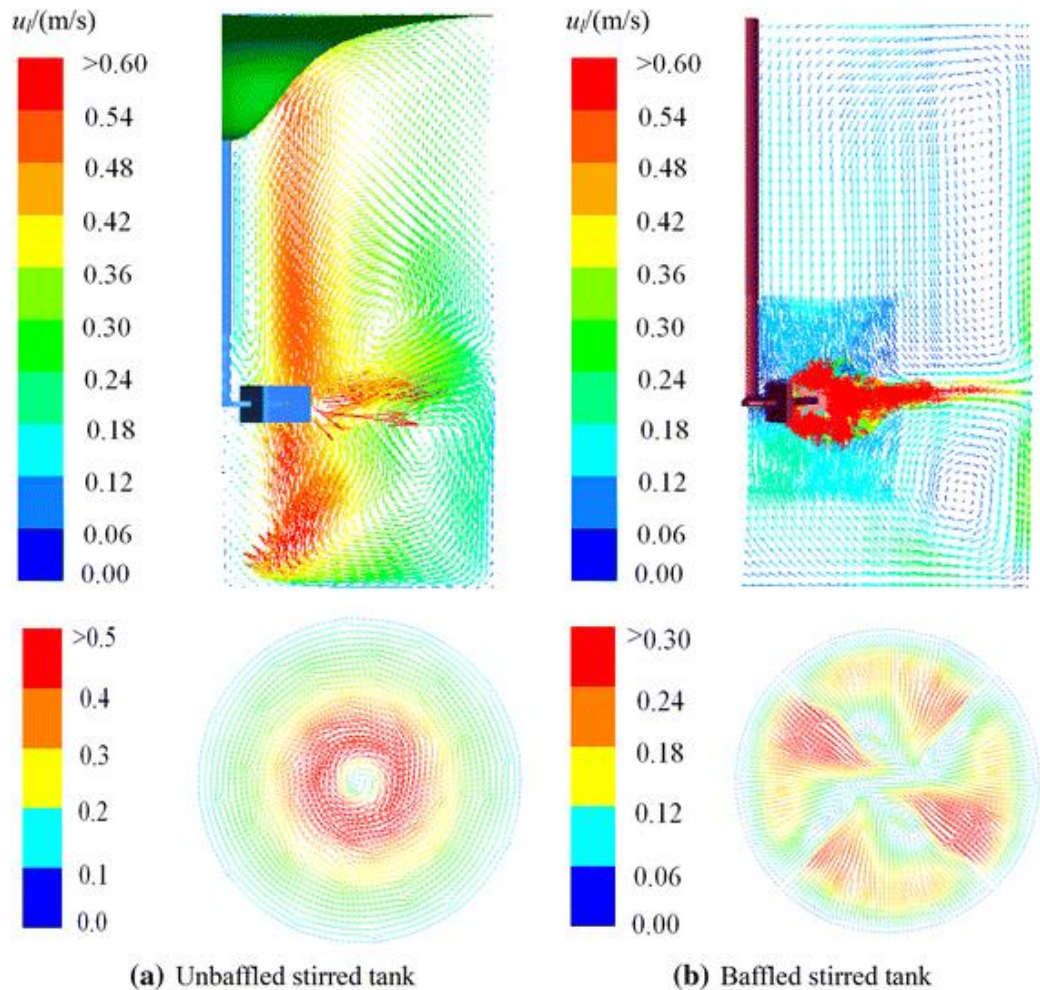


Figura 32: Vetor velocidade para diferentes planos em tanques agitados. (a) tanques sem chicanas (b) Tanques com chicanas. Fonte: (LI; XU, 2017)

Prakash et al. (2019) investigaram o efeito da velocidade do impelidor na forma do vórtice, na ingestão de gás-líquido devido ao contato do vórtice com o impelidor e distribuição de bolhas em um tanque agitado sem chicanas com um impelidor de disco de 0,08 m de diâmetro com quatro hélices (0,025 m de largura, 0,012 m de altura e

0,002 m de espessura) através de um experimento de sonda ótica e CFD. Os experimentos foram realizados em seis velocidades do impelidor de 300 a 800 rpm. Os resultados mostraram que à medida que a velocidade do impelidor aumenta, a largura e a profundidade do vórtice aumentam gradualmente. Para velocidades menores que 500 RPM a profundidade do vórtice permaneceu acima do impelidor. A 600 RPM o vórtice entrou em contato com o impelidor e causou ingestão de gás no líquido. Conforme a Figura 33, o gás inserido no líquido foi inicialmente jogado em direção a parede do tanque. Um aumento da velocidade do impelidor resultou em um aumento na profundidade do vórtice abaixo do plano do impelidor e uma maior dispersão do gás. O aumento na velocidade intensificou a quebra de bolhas e causou alta densidade de bolhas em toda a região do impelidor. A 800 rpm, o vórtice entrou em contato com o fundo do tanque, resultando na deformação da superfície do líquido abaixo do impelidor e, assim, causando instabilidade no torque. Com isso, os autores concluíram que a maior parte da energia dissipada pelas pás da turbina foram dissipadas para dispersar o gás, em vez de deformar a estrutura do vórtice. Além disso, a ausência de chicanas no tanque promoveu coalescência de bolhas que resultou em bolhas maiores, com um aumento na velocidade do impelidor.

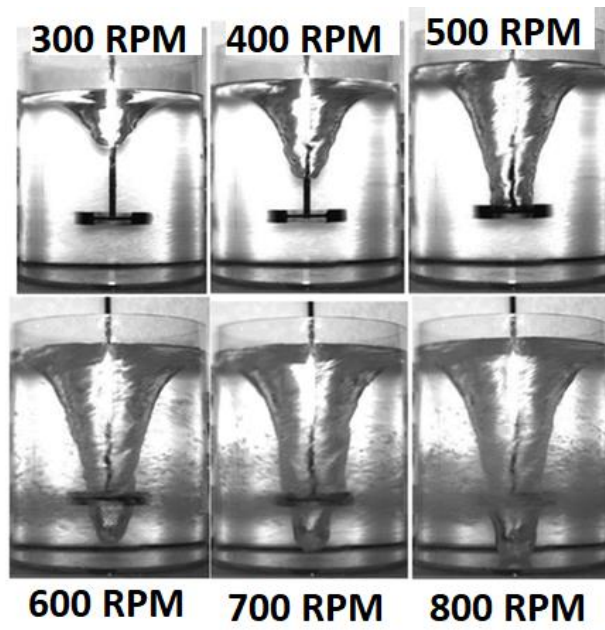


Figura 33 : Fotografias instantâneas da forma do vórtice. Fonte: (PRAKASH et al., 2019)

3. MODELAGEM MATEMÁTICA

Na dinâmica dos fluidos, as equações que modelam o escoamento no interior de tanques agitados são as equações de conservação de massa e de quantidade de movimento, para escoamentos monofásicos e bifásicos. Estas equações serão informadas nas seções a seguir. A turbulência será modelada pelo *SST k-omega*.

3.1. Escoamento monofásico

As equações diferenciais parciais de conservação de massa e quantidade de movimento, considerando escoamento monofásico, incompressível em regime permanente é dada por:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla(\mu(\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T)) + \mathbf{S}_M \quad (\text{Eq.8})$$

Onde ρ é a massa específica, t é o tempo, \mathbf{U} é o vetor velocidade, p é a pressão, μ é a viscosidade e \mathbf{S}_M é o termo fonte de quantidade de movimento.

Equação de conservação de massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho U) = 0 \quad (\text{Eq.9})$$

Onde ρ é a massa específica, t é o tempo e U é a velocidade.

3.2. Escoamento Bifásico

Na modelagem do escoamento bifásico adotou-se o modelo homogêneo no qual os fluidos compartilham o mesmo campo de pressão e velocidade. A conservação dessas variáveis é obtida resolvendo-se a equação de conservação de massa e a equação de conservação da quantidade de movimento. A fração volumétrica das fases é encontrada para a fase primária resolvendo a equação 16 e para a fase secundária, equação 17 (ANSYS CFX,2014)

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (\text{Eq.10})$$

$$\frac{\partial \alpha_1 \rho_1 \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot ((\alpha_1 \rho_1) \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) = \nabla p + \nabla \cdot (\alpha_1 \mu_1 (\nabla \cdot \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T)) + (\alpha_1 \rho_1) \mathbf{g} + S_M \quad (\text{Eq.11})$$

$$\frac{\partial \alpha_1 \rho_1}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_1 \rho_1 \mathbf{U}) = 0 \quad (\text{Eq.12})$$

$$\sum_{i=1}^{N_l} \alpha_i = 1 \quad (\text{Eq.13})$$

l indica a fase, α é a fração volumétrica da fase, \mathbf{g} é o valor da gravidade, N_l é o número de fases.

3.3. Modelo de turbulência

O modelo de turbulência utilizado é o modelo de transporte de tensão de cisalhamento (SST) ou *shear stress transport* desenvolvido por Menter (1994). Trata-se de uma combinação das vantagens dos modelos $k - \varepsilon$ e $k - \omega$, dado pelas equações:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + G_k - Y_k + S_k \quad (\text{Eq.14})$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right\} + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (\text{Eq.15})$$

Nesta equação o termo G_k representa a produção de energia cinética turbulenta, e é definido da mesma maneira que no modelo $k - \omega$. G_ω representa a geração de ω . Γ_k e Γ_ω representa a difusividade efetiva de k e ω , respectivamente, no qual são calculados como descritos abaixo. Y_k e Y_ω representa a dissipação de k e ω devido a turbulência. S_k e S_ω são termos definidos pelo usuário.

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (\text{Eq.16})$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (\text{Eq.17})$$

Onde σ_k e σ_ω são números turbulentos de Prandtl para k e ω respectivamente.

A turbulência viscosa μ_t é computada como:

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max\left[\frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{\alpha_1 \omega}\right]} \quad (\text{Eq.18})$$

Onde S é a taxa máxima de cisalhamento e

$$\sigma_k = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_k} + \frac{1-F_1}{\sigma_k}, 2} \quad (\text{Eq.19})$$

$$\alpha^* = \alpha_\infty^* \left[\frac{\alpha_0^* + Ret/R_k}{1 + Ret/R_k} \right] \quad (\text{Eq.20})$$

$$Ret = \frac{\rho k}{\mu \omega} \quad (\text{Eq.21})$$

$$R_k = 6 \quad (\text{Eq.22})$$

$$\alpha_0^* = \frac{\beta_i}{3} \quad (\text{Eq.23})$$

$$\beta_i = 0.072 \quad (\text{Eq.24})$$

Note que para um número alto de Reynolds $\alpha^* = \alpha_\infty^* = 1$

As funções *blending* F_1 e F_2 , são dados por:

$$F_1 = \tanh(\Phi_1^4) \quad (\text{Eq.25})$$

$$\Phi_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right), \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} D_\omega^+ y^2} \right] \quad (\text{Eq.26})$$

$$D_\omega^+ = \max \left[2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} 10^{-10} \right] \quad (\text{Eq.27})$$

$$F_2 = \tanh(\Phi_2^2) \quad (\text{Eq.28})$$

$$\Phi_2 = \max \left[2 \frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right] \quad (\text{Eq.29})$$

3.3.1. Condições iniciais de simulação

Adotou-se um sistema de coordenadas localizado no centro e no fundo do tanque. Nas simulações monofásicas, tem-se apenas água. Nas simulações bifásicas, a fração da volumétrica da água (α_w) e dada pela Equação (36) e a fração da volumétrica do ar (α_a) e dada pela Equação (37), nas quais, Z e a posição no eixo axial que passa pelo centro do tanque.

$$\alpha_w = if(Z \leq 0,23 [m], 1, 0) \quad (\text{Eq.30})$$

$$\alpha_a = if(Z > 0,23 [m], 1, 0) \quad (\text{Eq.31})$$

A Tabela 8 apresenta as condições iniciais para pressão, velocidade e turbulência adotadas nas simulações monofásicas e bifásicas

Tabela 8: condições iniciais

	Monofásico	Bifásico
Velocidade	0m/s	0 m/s
Pressão estática	0 Pa	Pressão hidrostática
Turbulência	5,00%	5,00%

4. ABORDAGEM NUMÉRICA

A abordagem numérica é fundamental para a solução de problemas, pois são raras as soluções analíticas, restando assim apenas uma abordagem via simulação ou através da realização de experimentos para geometrias complexas. Este capítulo tem como objetivo apresentar alguns conceitos além de citar a abordagem numérica utilizado neste trabalho.

4.1. Multiple Reference Frame (MRF)

Muitos problemas de engenharia envolvem domínios de escoamento rotativo. Um exemplo é este próprio trabalho, no qual utiliza tanques agitados por gaiola rotativa utilizados para analisar a incrustação em prospecção de poços de petróleo.

Para problemas em que todas as partes moveis estão girando a uma velocidade angular prescrita, e as paredes estacionárias são superfícies de revolução em relação a um eixo de rotação, todo domínio pode ser referido como uma única estrutura rotativa de referência. No entanto, quando cada uma das várias partes estão girando em torno de um eixo diferente, ou sobre o mesmo eixo com velocidades diferentes, um único sistema de coordenadas rotativas não é suficiente para “imobilizar” o domínio computacional e prever um campo de escoamento em estado estacionário. (ANSYS FLUENT,2014). Para esses problemas, deve dividir o modelo em vários domínios com interface fluido/parede (no qual foi realizado neste trabalho). Este tipo de domínio pode ser resolvido utilizando as equações de MRF (ANSYS CFX,2014). No MRF, para resolver soluções permanentes pode-se utilizar o *Frozen Rotor* que fixa os elementos da malha na interface entre os domínios. E o movimento do lado rotativo é contabilizado nas equações de conservação da quantidade de movimento

4.2. Solução numérica

Os métodos tradicionais para a solução numérica de equações diferenciais são os Métodos de Diferenças Finitas (MDF), de Volumes Finitos (MVF) e de Elementos Finitos (MEF).

No presente trabalho, foi utilizado o software ANSYS CFX 15.1, o qual utiliza o Método dos volumes finitos baseado em elementos (MVFbE), uma variação do método dos volumes Finitos, utilizando definições do método dos elementos finitos, o que alia as vantagens de garantir a conservação da propriedade transportada e de trabalhar com geometrias complexas (RIBEIRO,2012). Para obtenção da solução do modelo, utilizou-se uma malha não estruturada. Maiores detalhes podem ser encontrados no capítulo de resultados.

Os resultados foram obtidos através do código computacional CFX 15.1. As simulações foram realizadas em um computador Corel intel(R) Core(TM) i5-7300HQ CPU 2.50GHz e 8 GB de RAM.

4.3. Discretização dos termos advectivos

Para completar a discretização dos termos advectivos é necessário aproximar a variável ϕ nas faces do volume de controle. Na literatura encontra-se diversas formas de se realizar esta aproximação, dentre as quais se destacam: o esquema de Diferenças Centrais (*Central Differencing Scheme*); esquema Upwind (*Upwind Differencing Scheme*); esquema Híbrido (*Hybrid Differencing Scheme*); esquema Power Law (*Power Law Scheme*); *High Resolution* esquema de 2° ordem QUICK (*Quadratic Upwind Differencing Scheme*); esquema de 3° ordem (*TVD Schemes*) (SOPHIA,2010).

Os termos advectivos discretizados possuem a seguinte forma geral (SOPHIA,2010):

$$\phi = \phi_{up} + \beta \nabla \phi \cdot \Delta \vec{r} \quad (\text{Eq.32})$$

Onde ϕ_{up} é o valor de ϕ no nó a montante, \vec{r} é o vetor do nó a montante para a posição na face do volume de controle onde se deseja aproximar ϕ e $\nabla \phi$ é o gradiente dos nós a montante. Para esquemas de discretização diferentes, a forma de calcular $\nabla \phi$ e β são também diferentes.

Para este trabalho foi utilizado *Upwind*, nos termos das equações de turbulência e *High Resolution nas demais*.

4.4. Critérios de convergência

A simulação numérica é realizada até que um critério de convergência seja satisfeito. O critério de convergência adotado no presente trabalho é o RMS (*Root Mean Square*), onde são verificados se o RMS dos resíduos (r_φ) das equações de conservação de massa e quantidade de movimento são menores que 10^{-4} . O resíduo é dado por (ANSYS CFX,2014) como:

$$r_\varphi = b - A\varphi_s \quad (\text{Eq.33})$$

Tal que:

$b \rightarrow$ é um vetor de valores do sistema

$A \rightarrow$ é a matriz de coeficientes

$\varphi_s \rightarrow$ é o vetor solução

4.5. Geração da malha

Uma malha computacional é a representação do plano físico utilizado na simulação numérica. A solução de um modelo matemático pode ser simples quando empregado uma malha bem construída.

Para este estudo foram geradas cinco malhas com refinamentos, número de elementos e nós distintos (Tabela 9). Para garantir a semelhança entre as malhas, o número de conectividade foi o mesmo para as cinco. O número de conectividade representa quantos elementos tocam um nó e determina o quão compacta é a malha.

Tabela 9: Dados das malhas

	Malha 1	Malha 2	Malha 03	Malha 04	Malha 05
Nº de elementos	1921556	455496	857280	2389492	3479748
Nº de nós	2026577	490760	921148	2501600	3615624
Nº de conectividade max	10	10	10	10	10

As malhas foram construídas inteiramente com elementos hexaédricos por meio da divisão em blocos utilizando o recurso *Blocking* do IcemCFD 14.5. o procedimento seguiu os seguintes passos:

- Criação de um bloco contendo todo o volume de controle;
- Aplicação do recurso *Ogrid* para melhorar a qualidade dos elementos junto à parede e contornar a lateral do cilindro interno;
- Corte dos blocos para contornar os limites superior e inferior do cilindro interno;
- Exclusão dos blocos internos da haste e do cilindro interno;
- Aplicação do recurso *Ogrid* para melhorar a qualidade dos elementos junto às paredes das janelas.

- Configuração dos parâmetros de refinamento e geração da malha.

As Figura 34 a Figura 38 mostram os detalhes de cada umas das malhas.

Malha 1 – Tanque Original (com janelas + RC + Impelidor)

No total dos domínios, a malha utilizada no modelo proposto é composta por 2026577 nós e 1921556 elementos, a quantidade de nós e elementos para cada domínio é informado na tabela abaixo.



Figura 34: Detalhes da malha superficial do tanque original: a esquerda a malha da parede do tanque; a direita, malha no RC e impelidor

Malha 2 – Tanque ASTM(Bifásico)

No total dos domínios, a malha utilizada no modelo proposto é composta por 490760 nós e 455496 elementos, a quantidade de nós e elementos para cada domínio é informado na tabela abaixo.

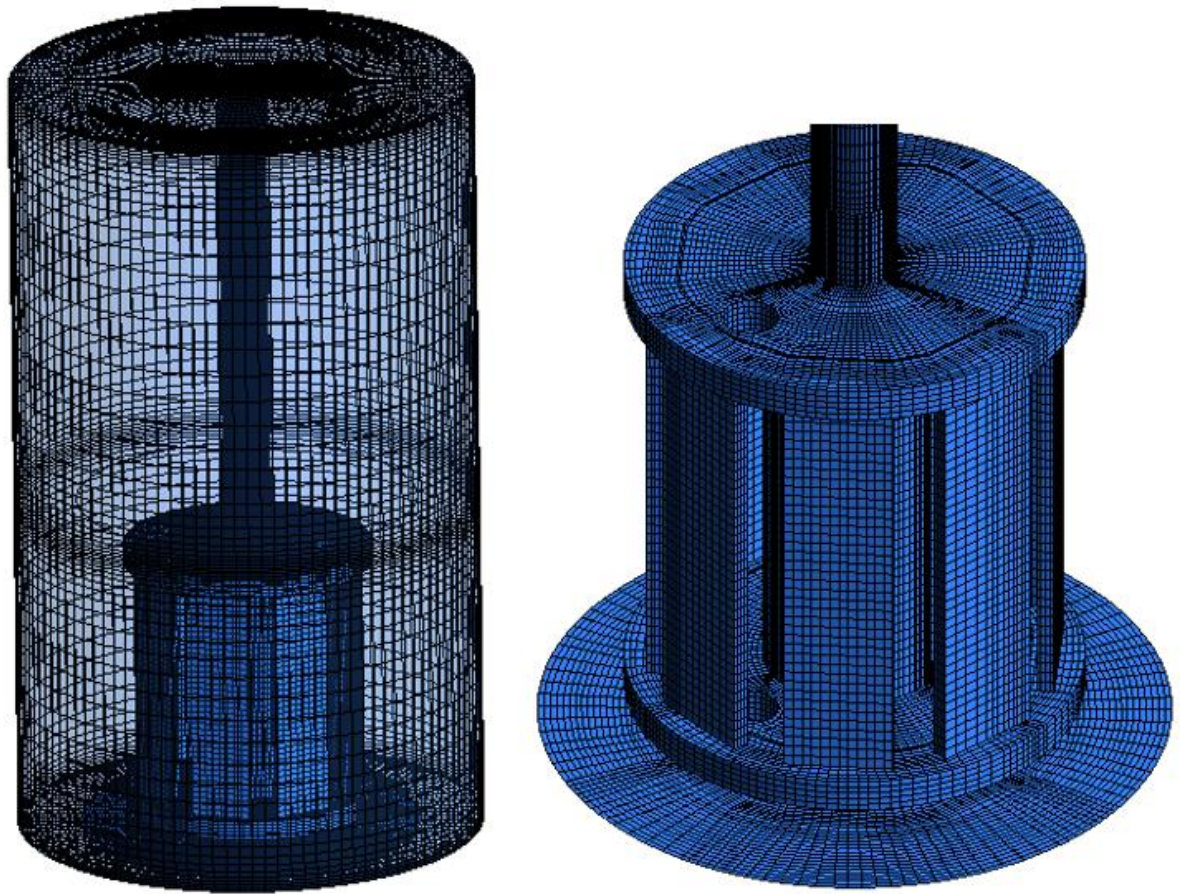


Figura 35: Detalhes da malha superficial do tanque ASTM bifásico: a esquerda a malha da parede do tanque; a direita, malha no RC.

Malha 3 – Tanque liso (sem janelas + RC + Impelidor)

No total dos domínios, a malha utilizada no modelo proposto é composta por 921148 nós e 857280 elementos, a quantidade de nós e elementos para cada domínio é informado na tabela abaixo.



Figura 36: Detalhes da malha superficial do tanque liso (sem janelas + RC+impelidor): a esquerda a malha da parede do tanque; a direita, malha no RC e impelidor

Malha 4 – Tanque liso (sem janelas + RC + Impelidor)

No total dos domínios, a malha utilizada no modelo proposto é composta por 1755674 nós e 1668052 elementos, a quantidade de nós e elementos para cada domínio é informado na tabela abaixo.

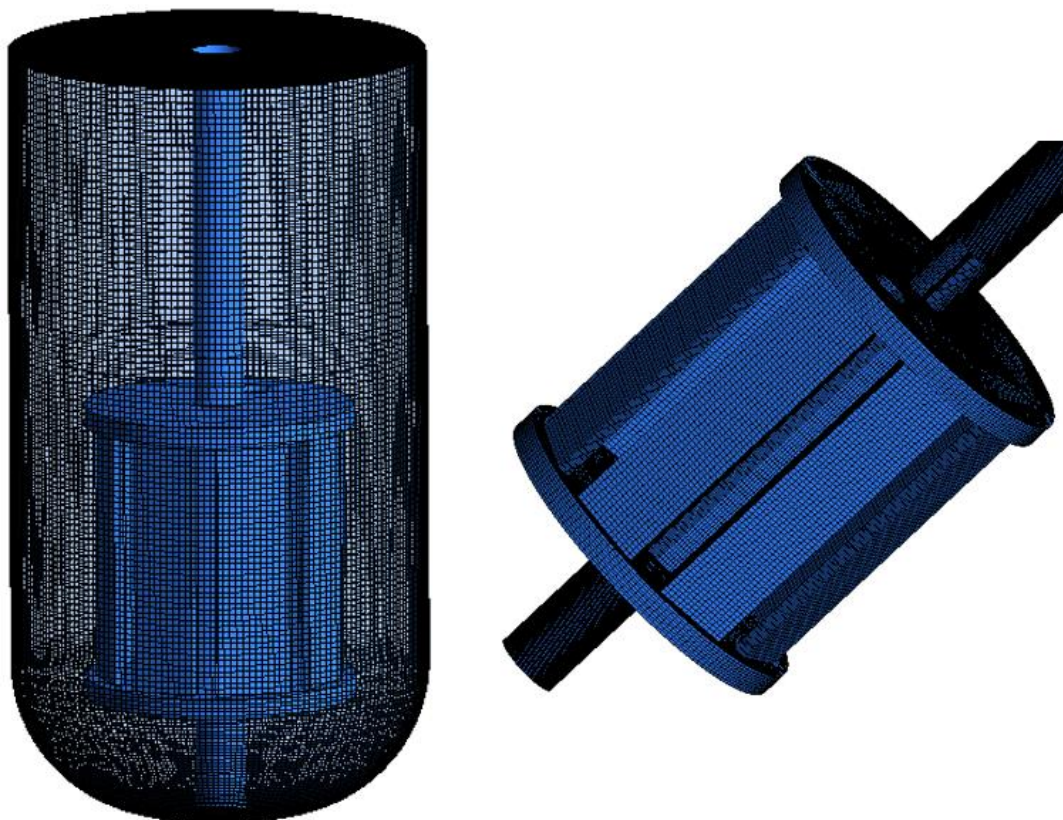


Figura 37: Detalhes da malha superficial do tanque liso (sem janelas + RC): a esquerda a malha da parede do tanque; a direita, malha no RC.

Malha 5 – Tanque ASTM (Monofásico)

No total dos domínios, a malha utilizada no modelo proposto é composta por 2026577 nós e 1921556 elementos, a quantidade de nós e elementos para cada domínio é informado na tabela abaixo.



Figura 38: Detalhes da malha superficial do Tanque ASTM: a esquerda a malha da parede do tanque; a direita, malha no RC

4.5.1. Condições de contorno

As Figura 39, Figura 40 e Figura 41 ilustram as condições de contorno utilizada neste trabalho.

- Onde é considerado Topo tanque adotou-se a condição *Free Slip wall* no qual considera o atrito com o fluido.
- Nos pontos Parede Tanque, Parede Haste, e aparato adotou-se *No Slip Wall* no qual considera o atrito com o fluido;
- Nos pontos Cilindro Topo, Cilindro Lateral, Cilindro Lateral Inclinado e Cilindro Fundo é considerado *Conservative Interface Flux*

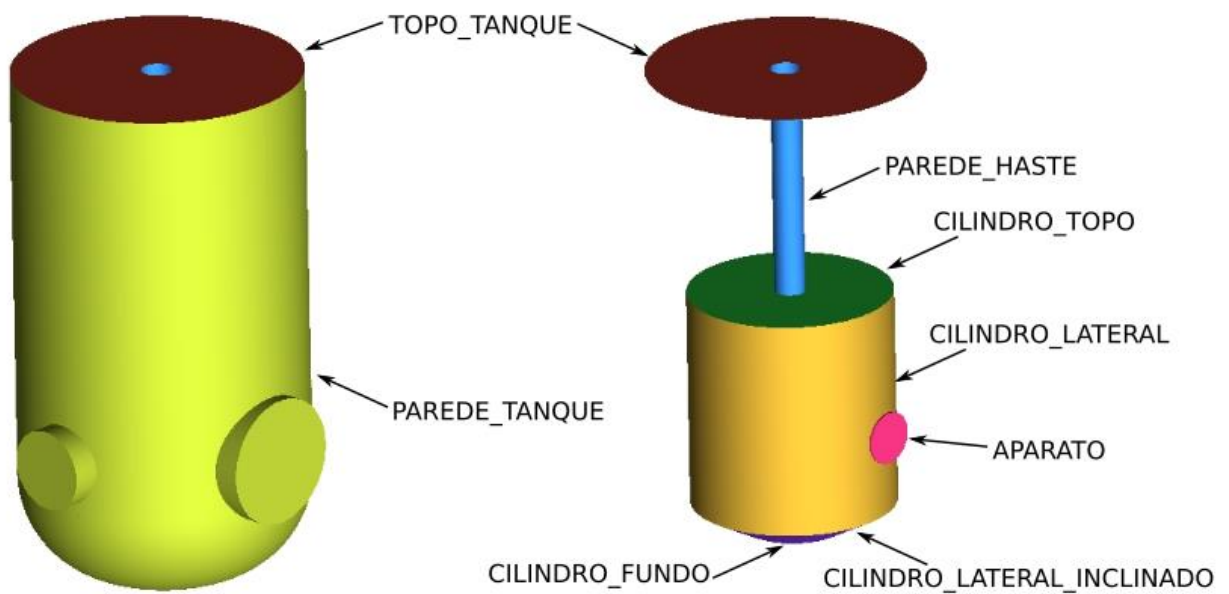


Figura 39: Definição dos contornos para as simulações: contornos externos (A) e internos (B) para o tanque original. Fonte: O autor

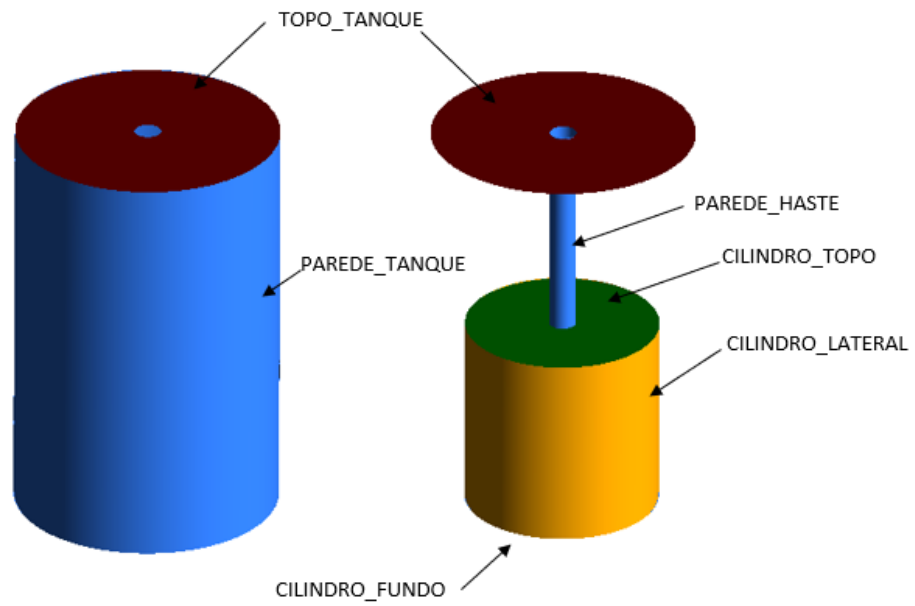


Figura 40: Definição dos contornos para as simulações: contornos externos (A) e internos (B) para o tanque ASTM G170. Fonte: O autor

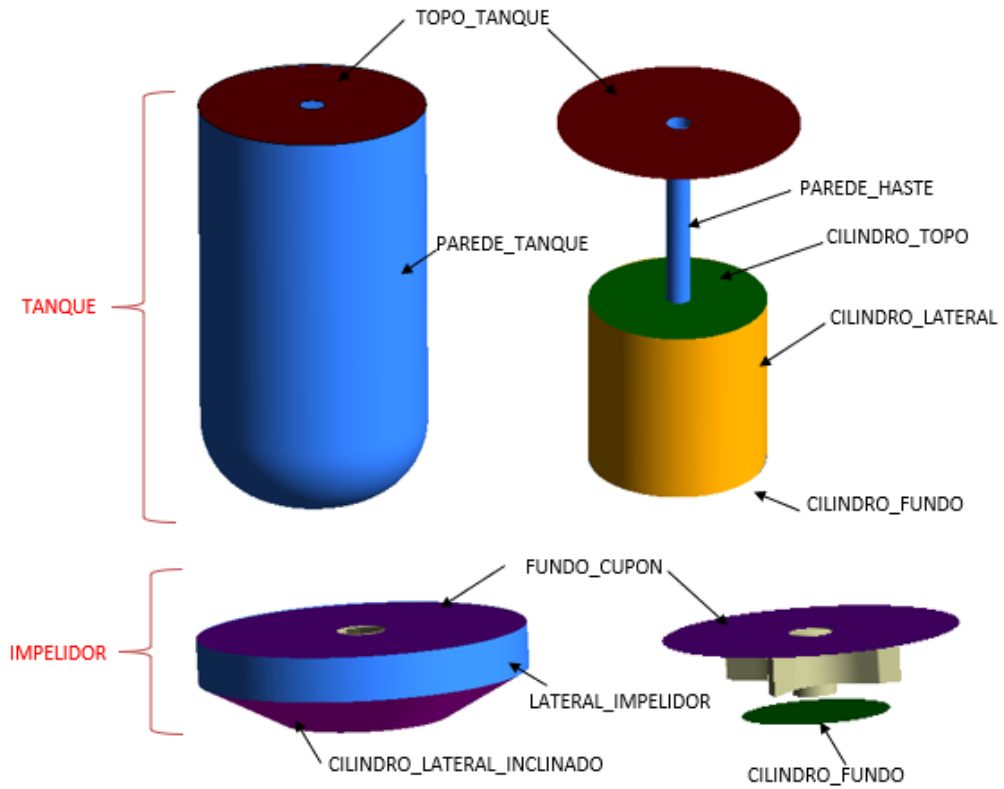


Figura 41: Definição dos contornos para as simulações: contornos externos (A) e internos (B) para o tanque liso com impelidor e sem impelidor. Fonte: O autor

5. METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho para análise dos parâmetros hidrodinâmicos em um tanque agitado sem chicanas com janelas de visualização será numérica e experimental conforme descrito abaixo.

A Figura 42 apresenta a sequência de processos a serem seguidos para desenvolvimento e finalização do trabalho. No início do processo, três reatores são desenhados no software CAD (desenho assistido por computador), sendo o tanque original, tanque sem janelas e o tanque ASTM. Após a etapa CAD, o tanque liso e o tanque ASTM são fabricados e analisados experimentalmente. Além disto, este trabalho contará com uma análise numérica através do software ANSYS CFX 15.1 dos três reatores, em seguida os resultados da análise experimental e numérica são comparados.

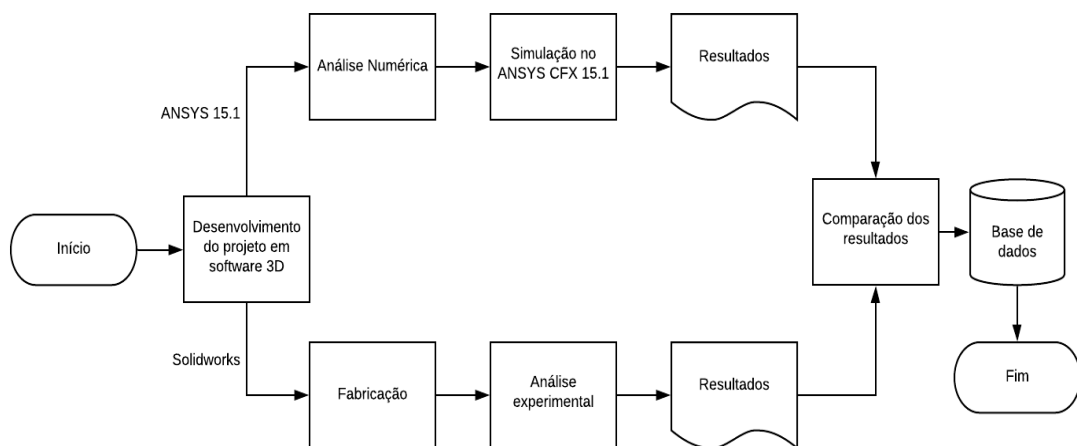


Figura 42: Fluxograma da metodologia utilizada no trabalho. Fonte: O Autor

5.1. Tanque original

Os estudos das incrustações serão avaliados em um reator pressurizado, agitados por uma gaiola rotativa e um impelidor não convencional, sem chicanas, com janelas de visualização, onde será acoplado uma câmera para monitoramento microscópico da formação dos cristais. Conforme a Figura 43

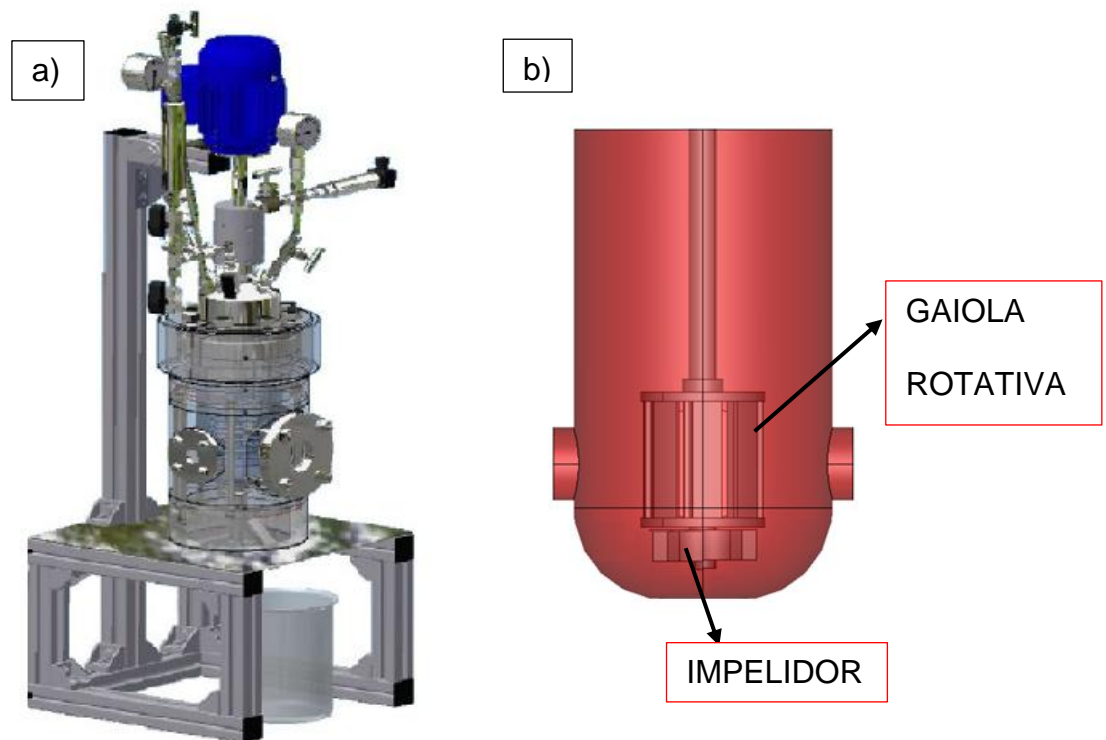


Figura 43: Representação do reator original b) Geometria interna do reator com gaiola rotativa e impelidor.

As dimensões padrões para tanques agitados podem ser utilizados em vários processos, mas conforme discutido neste trabalho, não necessariamente são a melhor opção. Para as simulações a modelagem geométrica seguirá os padrões do tanque original a fim de obter os resultados mais próximos do real. Mais detalhes podem ser vistos na secção abaixo.

Modelagem geométrica

A Figura 44, Figura 45 e Figura 46 mostram a geometria e dimensões do tanque e da gaiola rotativa juntamente com o impelidor, onde o tanque possui diâmetro (T) de 127 mm, e fundo de tanque de 0,15T (19,4 mm) altura do líquido é de 1,8T (127 mm), além disso, o tanque possui uma janela de visualização com diâmetro 56 mm, para permitir o registro das análises experimentais.

O impelidor possui o diâmetro $D = 60,2$ mm e Largura $W = 15$ mm e cupons com altura de 66,4 mm e diâmetro de 61 mm.

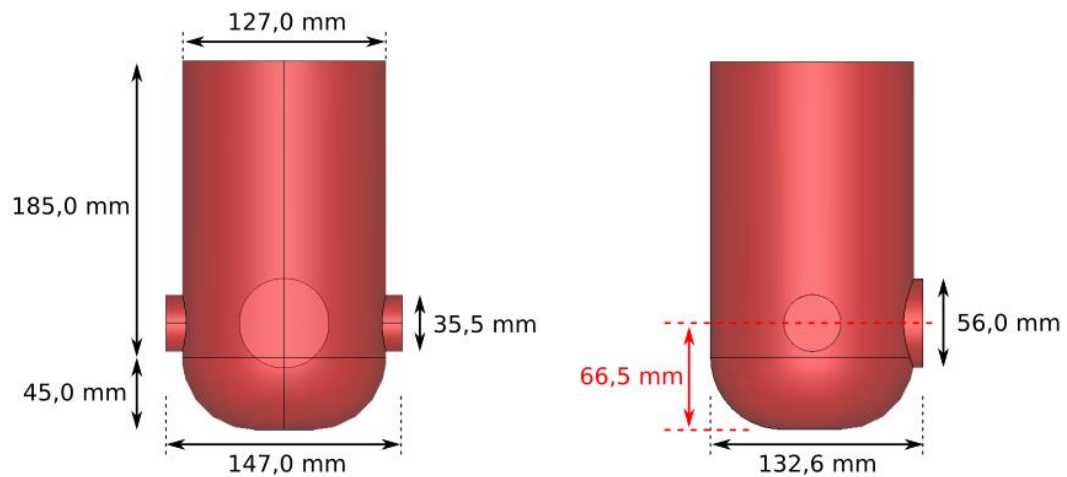


Figura 44: Geometria do tanque. Fonte: O autor

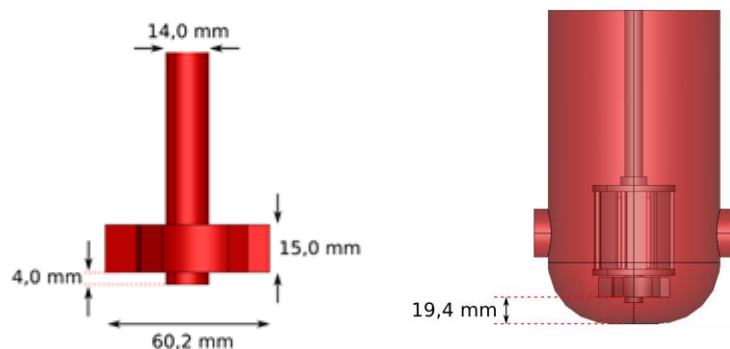


Figura 45: Geometria do impelidor e configuração do tanque. Fonte: O autor

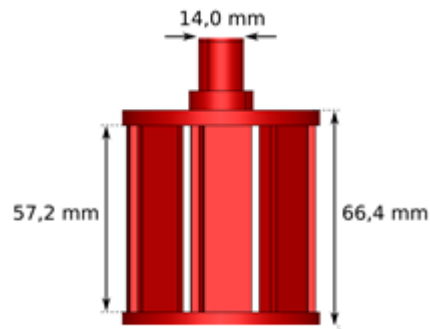


Figura 46: Configuração do cupon. Fonte O autor

Tanque sem janelas

Para avaliar a influência das janelas na hidrodinâmica do tanque, simulou-se uma versão sem janelas do mesmo (tanque liso). As dimensões do tanque e impelidor são as mesmas do tanque original, com exceção da presença das janelas. A base do tanque foi fabricada em uma impressora 3D da marca *Stratasys objet 30 Pro* e material de impressão veroblack. A Figura 47 mostra este sistema.



Figura 47: Tanque sem janelas

Tanque para validação

A validação da metodologia foi realizada aplicando as configurações adotadas neste trabalho, no sistema da norma ASTM G170, adotada na literatura como padrão para análise de corrosão e também sendo utilizada para estudos em incrustações. A Figura 48 apresenta este sistema.



Figura 48: Tanque ASTM G170 para validação.

5.2. Matriz de simulações

Este estudo contempla análise experimental e numérica. Para a análise numérica, foram realizadas simulações para 4 reatores com características diferentes. O primeiro dele é o tanque original, no qual as simulações são realizadas para Re entre 3361 (50 RPM) e 120998 (1800 RPM), considerando que o tanque está preenchido com água de massa específica igual a 997 kg/m^3 e viscosidade $0,0008899 \text{ kg/(m/s)}$ e o escoamento é monofásico. Os mesmos parâmetros de simulação são realizados para o tanque liso sem janelas (Com impelidor + RC) para assim avaliar a influência da janela sobre o escoamento. O tanque liso sem janelas com gaiola rotativa e sem impelidor foi simulado para Re de 6722 e 20166 para avaliar o escoamento sobre a ausência do impelidor e a tensão de cisalhamento sobre os cupons. Em todos os experimentos o sentido de rotação do eixo é anti-horário. A validação da metodologia foi feita reproduzindo o sistema da norma ASTM G170 para Re de 6722 (100 RPM) até 57138 (850RPM) no sistema monofásico, e para Re de 20166 (300 RPM) no sistema bifásico considerando uma coluna de líquido de 0,23 m com água de massa específica igual a 997 kg/m^3 , e acima do líquido tem-se ar de massa específica igual a $1,185 \text{ kg/m}^3$.

Utilizou-se o trabalho de Vera *et al* (2017) para validação do modelo utilizado neste trabalho, além da análise experimental informada acima.

A análise experimental foi realizada para o tanque ASTM G170 e para o tanque liso sem janelas com gaiola rotativa e sem impelidor, foi utilizado água para analisar o escoamento em ambos os tanques, e a configuração geométrica e volume de líquido seguiram os mesmos padrões da análise numérica, para obtermos assim resultados de comparação. O quadro abaixo informa a matriz de simulações para melhor compreensão.

MATRIZ DE SIMULAÇÕES					
Reator	Quantidade de simulações	Velocidade de rotação (RPM)	Malha	Escoamento	Análise
Tanque original (com janelas + gaiola rotativa + impelidor)	9	50 - 100 - 200 - 300 - 400 - 500 - 600 - 700 - 900 - 1800	Malha 1	monofásico	NUMÉRICO
Tanque ASTM	1	300 RPM	Malha 2	Bifásico	
Tanque liso sem janelas (com impelidor + gaiola rotativa)	9	50 - 100 - 200 - 300 - 400 - 500 - 600 - 700 - 900 - 1800	Malha 3	monofásico	
Tanque liso sem janelas (com gaiola rotativa, sem impelidor)	2	100 e 300	Malha 4	monofásico	
Tanque ASTM	4	100 - 300 - 500 - 850	Malha 5	monofásico	
Tanque liso sem janelas (com gaiola rotativa, sem impelidor)	4	100 - 300 - 500 - 600	-----	-----	EXPERIMENTAL
Tanque ASTM	4	100 - 300 - 500 - 600	-----	-----	

5.3. Delineamento experimental

A seguir são apresentados os aparatos utilizados para verificação experimental da forma da superfície livre. Os experimentos foram realizados nas dependências do laboratório de petróleo do Departamento de Pós Graduação em Energia (PPGEN) do Centro Universitário Norte do Espírito Santo da Universidade Federal do Espírito Santo.

Os ensaios para análise de vórtice de superfície livre foram realizados tanto para o tanque ASTM G170 quanto para o tanque liso (sem janelas + RC). Para o tanque

ASTM G170 tanto a base quanto o cilindro foram fabricados em acrílico. Já para o tanque liso a base foi fabricada via impressora 3D da marca *Stratasys Objet 30 Pro* e material veroblack, já o cilindro foi fabricado em acrílico. O sistema RC, impelidor e tanque foram colocados no interior de uma caixa acrílica sobre um suporte em acrílico, a caixa selada é preenchida com água com a finalidade evitar a distorção ótica causada pelo acrílico, no qual possui dimensões de 240x240x450mm. Além disso para o tanque liso no aparato experimental não conta com o impelidor, sendo assim o sistema rotativo apenas a gaiola. A Figura 49 mostra o esquemático do sistema desenhado no software *Solidworks*, já a Figura 50 mostra o tanque ASTM G170 e tanque liso após serem fabricados.

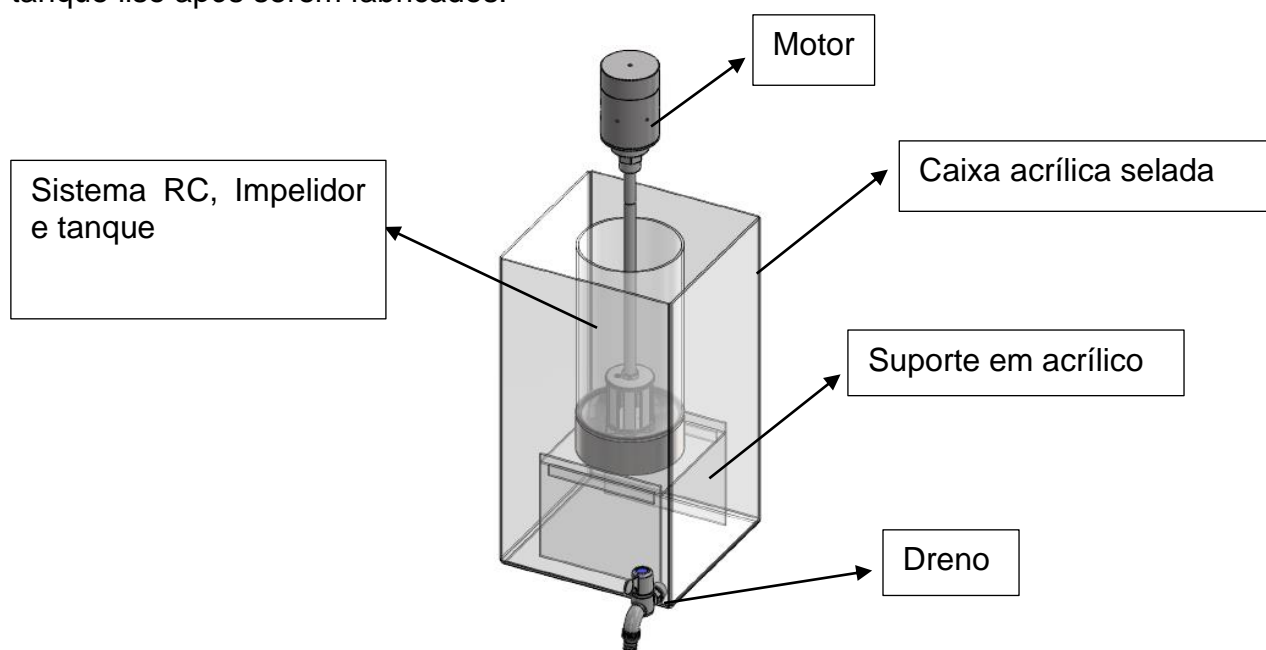


Figura 49: esquemático do sistema completo montado desenhado no software *Solidworks*.

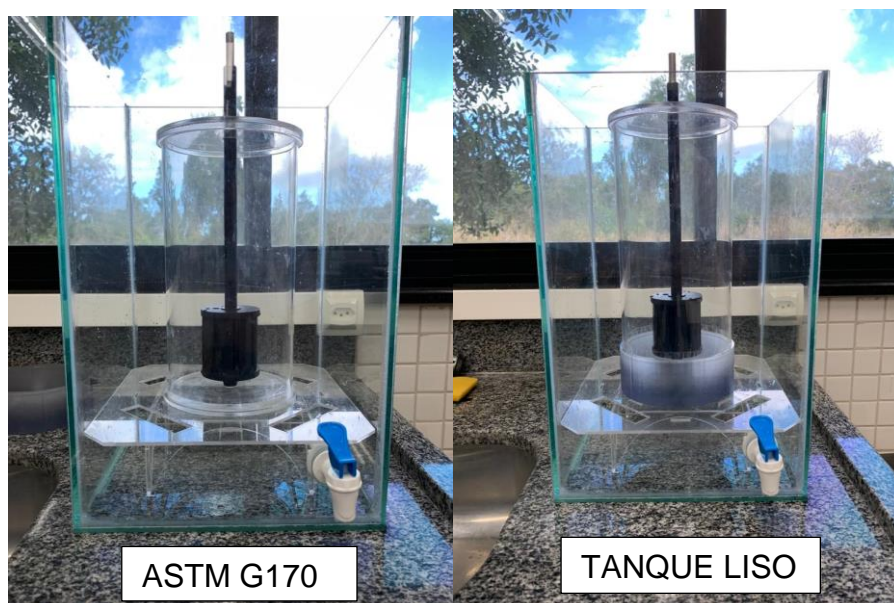


Figura 50: Tanque ASTM G170 apresentando o fundo do tanque chato e sem impelidor à esquerda e tanque liso com fundo do tanque abaulado à direita.

Um fator importante a ser observado no aparato experimental é o sistema rotativo, o eixo é centralizado por uma tampa de acrílico que fica na parte superior do cilindro acrílico, o eixo passa pela gaiola rotativa e é apoiado em um rebaixo no centro da base do tanque. A gaiola rotativa do tanque liso possui uma diferença para o tanque ASTM G170, esta diferença é exercida pela distância (altura) da base que pode ser visto com a Figura 51.

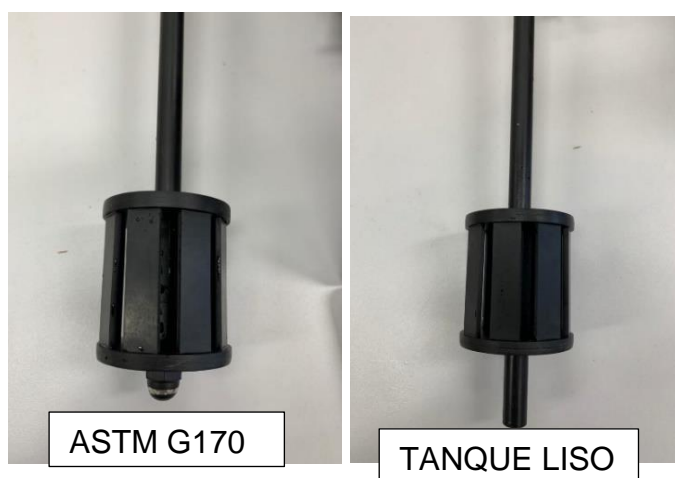


Figura 51: Sistema rotativo tanque ASTM G170 à esquerda e tanque liso à direita.

O sistema completo pode ser visto na Figura 52 abaixo.



Figura 52: Aparato experimental completo

6. RESULTADOS E DISCUSÃO

Este capítulo mostra os resultados obtidos para os modelos descritos no capítulo de metodologia.

Primeiramente foram verificados a validação da metodologia fazendo uma comparação com os resultados obtidos no trabalho de Vera *et al.* (2017) para um tanque ASTM G170, este teste deveria ser feito também para o Tanque original no qual possui impelidor não convencional e a gaiola rotativa, mas não foram encontrados dados para verificação deste sistema, por se tratar de um sistema inovador. Portanto, considera-se que o modelo avaliado para o sistema ASTM G170 também terá sua aplicação verificada no sistema do Tanque original.

Após a verificação do modelo foram avaliados, o campo de velocidade, campo turbulento para a velocidade de 100 RPM. Além disso, foi analisado o vetor velocidade na vizinhança dos cupons para o tanque ASTM G170.

A seguir foram avaliados a influência das janelas sobre o escoamento fazendo uma comparação do tanque original com o tanque liso (com RC+ Impelidor). Também foram verificados a influência da ausência do impelidor no escoamento do tanque, na vizinhança dos cupons e na tensão de cisalhamento gerada na parede dos cupons.

Complementando a análise dos sistemas foi realizado um estudo experimental com o tanque liso fabricado apenas com a gaiola rotativa e Tanque ASTM G170 com o objetivo de analisar o vórtice de superfície livre, esta análise foi realizada variando a rotação de 100 a 600 RPM, visto que valores superiores dificultaram a análise devido à alta vibração do sistema.

Finalmente é apresentado a análise do modelo sobre o tanque original, apresentando os campos turbulentos e de velocidade, para uma rotação de 100 RPM.

6.1. Validação da metodologia numérica: tanque ASTM g170

Para que a metodologia numérica adotada neste trabalho represente satisfatoriamente um cenário real, a validação foi realizada comparando os dados da tensão de cisalhamento do sistema de Vera et al (2017) que também utilizou o tanque da norma ASTM G170. Além disso, a validação foi realizada comparando o vórtice de superfície livre do tanque ASTM G170 fabricado para teste neste trabalho e o CFD (Bifásico) usado.

O tanque ASTM G170 estudado por Vera et al (2017) foi simulado com a mesma metodologia adotada neste trabalho, e os resultados comparados entre si, em termos de tensão de cisalhamento por rotação.

Na Figura 53, a metodologia empregada neste trabalho conseguiu prever satisfatoriamente os resultados obtidos no trabalho experimental de Vera et al (2017) apresentando dados quantitativos próximos.

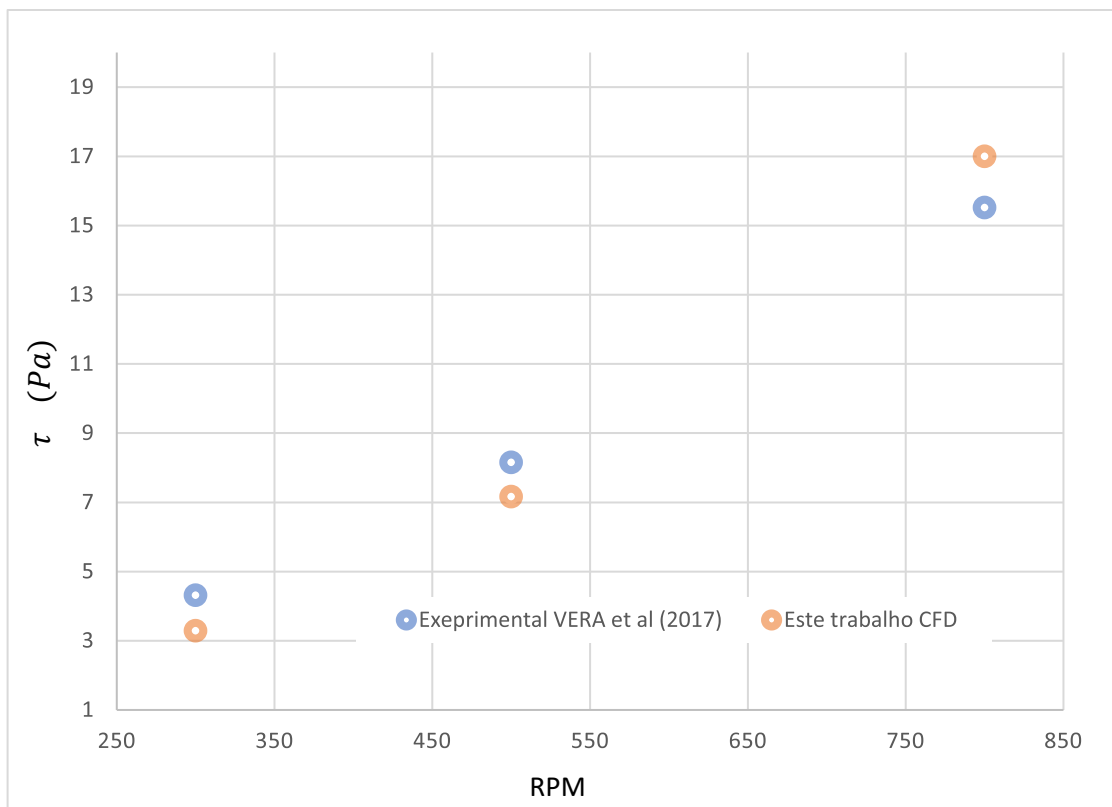


Figura 53: Tensão de cisalhamento x Rotação.

6.2. Validação experimental

Na comparação dos experimentos com o modelo bifásico mostrado na Figura 59 em dados qualitativos o modelo CFD conseguiu prever a 300 RPM boa concordância com o vórtice obtido no experimental. Não foram realizadas mais simulações bifásicas para comparação dos resultados por dificuldade de determinar um passo de tempo para que a simulação pudesse convergir.

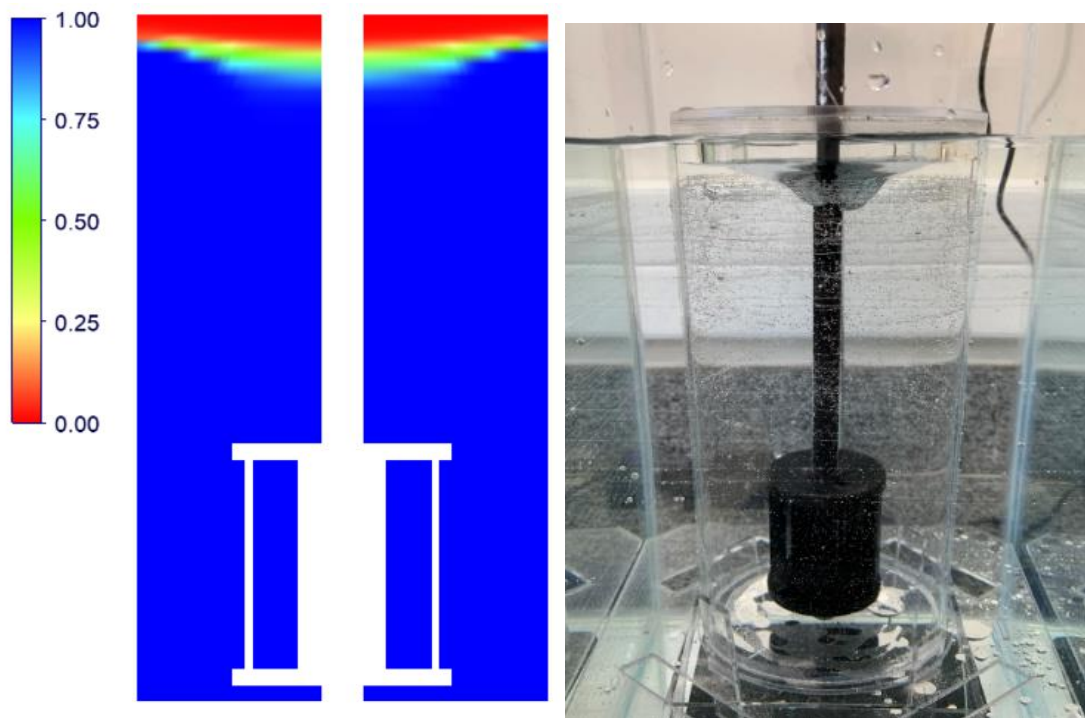


Figura 54: Comparação vórtice de superfície livre experimental x bifásico a 300 RPM.

6.3. Análise CFD tanque ASTM G170 fabricado

Campo de velocidade.

Analisando a hidrodinâmica do tanque ASTM G170 que passa pelo meio do tanque para Re de 6722 (100 rpm). Observa-se que a gaiola rotativa desloca os vetores para o fundo do tanque e em seguida é direcionado para cima indo até o topo

e posteriormente descendo formando um grande vórtice. Além disso, a pequena distância da gaiola rotativa com o fundo do tanque faz com que não exista uma região de baixa velocidade em baixo da gaiola rotativa. Esta condição apresentada para este tanque é favorável na análise de incrustação, visto que as partículas se manterão suspensas. Entretanto, uma análise experimental é necessário para garantir esta afirmação.

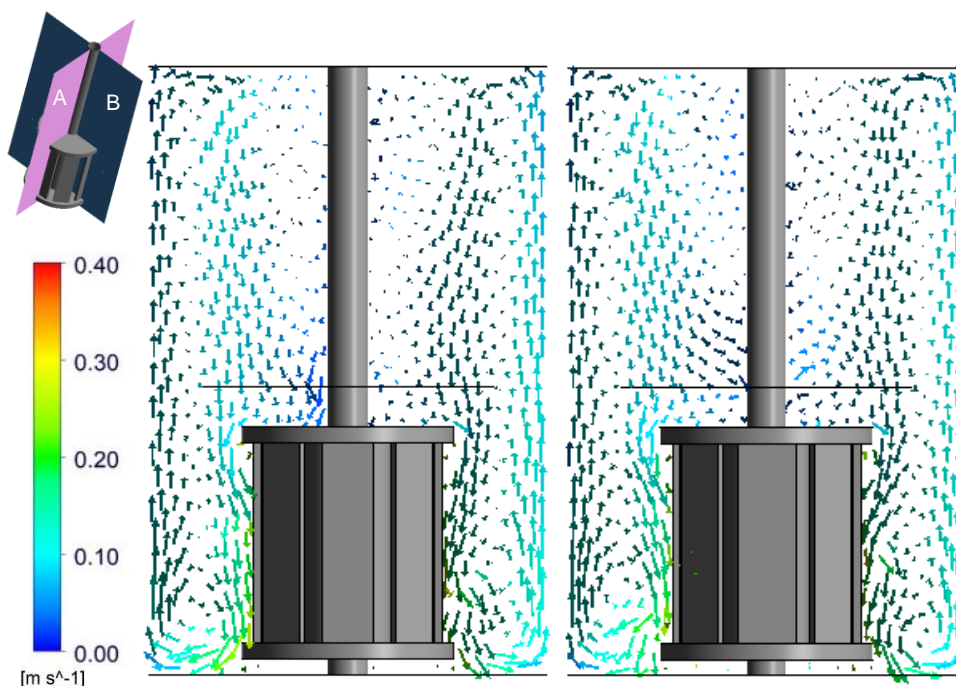


Figura 55: Campo de velocidade tanque ASTM G170. A esquerda é referente ao plano A e à direita plano B.

Contorno de velocidade.

A Figura 56 mostra o perfil de velocidade à 100 rpm da seção transversal localizada no meio da gaiola. Como esperado, a vizinhança dos cupons apresentou velocidades maiores comparado com regiões mais afastadas, isso é mostrado na Figura 57 no mesmo plano traçado para a velocidade de 100 rpm os vetores velocidade instantânea.

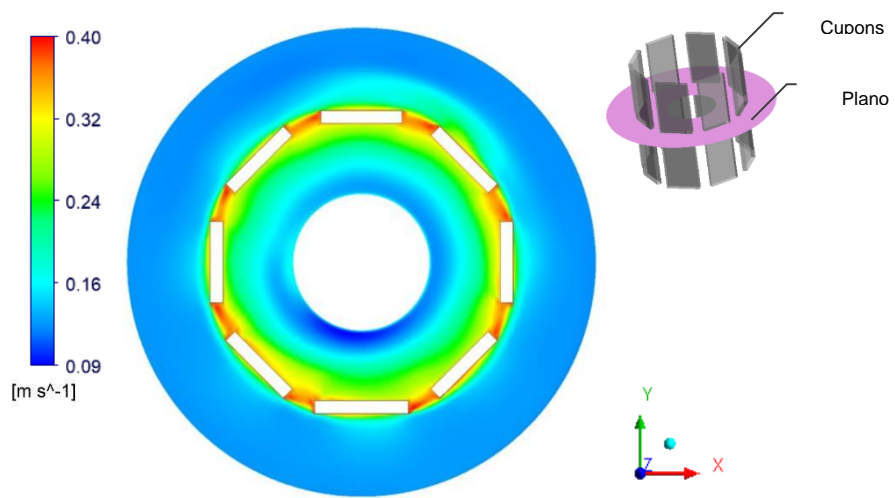


Figura 56: Contorno de velocidade tanque ASTM G170.

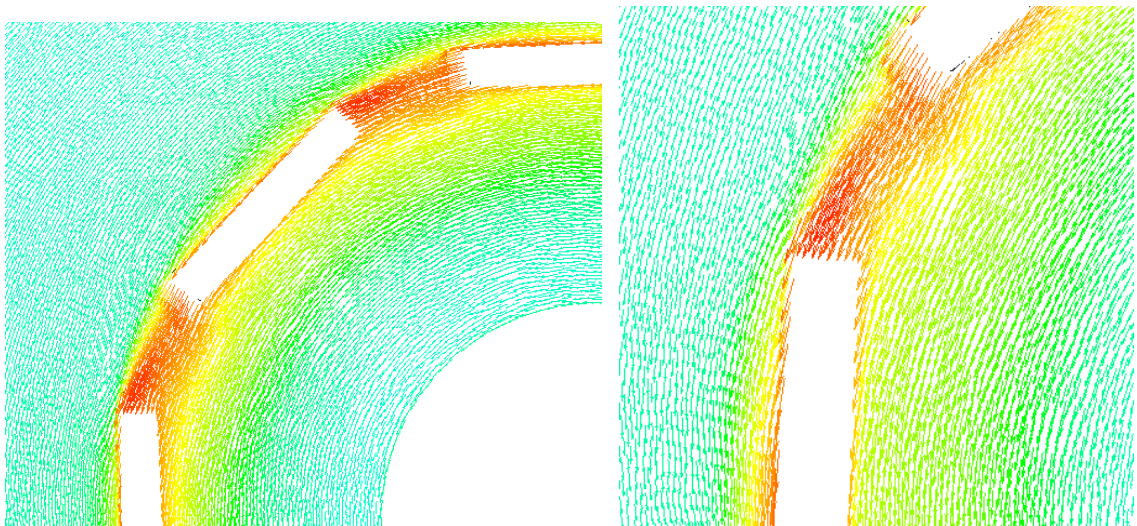


Figura 57: Vetor velocidade nas vizinhanças dos cupons.

Energia cinética turbulenta

A distribuição da energia cinética turbulenta do tanque ASTM G170 a 100 rpm mostra-se mais distribuída próximo a região dos cupons o que garante maior homogeneização nesta região. Já na parte superior a mistura pode ser prejudicada.

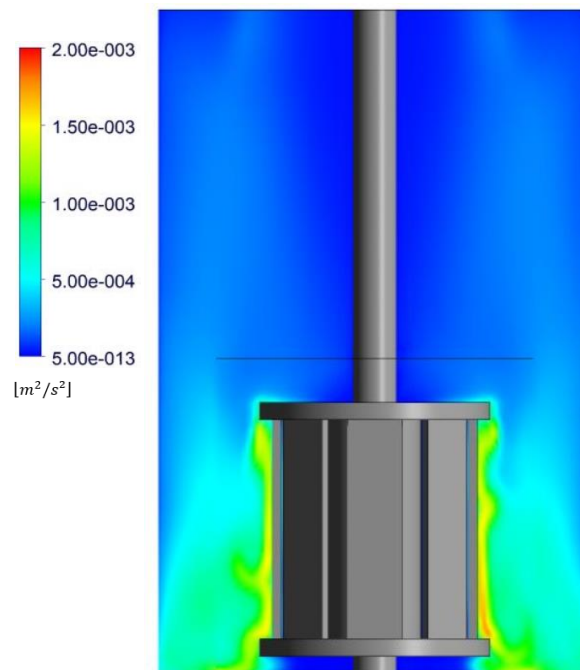


Figura 58: Energia cinética turbulenta para o tanque ASTM G170 a 100 rpm.

Tensão de cisalhamento

Para a análise da distribuição da tensão de cisalhamento na superfície externa nos cupons, foi necessário a análise do y^+ (distância adimensional à parede), que é definida pelo manual do CFX (*ANSYS CFX-Solver Theory Guide*) através da equação:

$$y^+ = \frac{\sqrt{\tau_w / \rho \Delta n}}{\nu} \quad (\text{Eq.34})$$

Onde τ_w é a tensão de cisalhamento agindo sobre a parede, ρ é a densidade do fluido, ν é a viscosidade cinemática e Δn é a distância entre o primeiro e o segundo nó da malha, junto à parede.

. Conforme mostrado na Tabela 10 abaixo, mesmo utilizando uma malha mais refinada (malha 4 utilizada neste trabalho) os valores da malha \underline{A} apresentou número

de nós igual a 1925048, número de elementos 1838728, e se aproximou dos resultados obtidos dos valores mínimos e máximos próximos tanto para o y^+ quanto para a tensão de cisalhamento da malha mais refinada. Além disso em ambas as malhas os valores de y^+ são menores que 200, o que é recomendado pelo ANSYS CFX. Outro fator importante a se observar são os valores diferentes de y^+ para cada rotação, que pode ser efeito do escoamento complexo na vizinhança dos cupons.

Tabela 10: Valores mínimos e máximos da distância da parede adimensional y^+ e tensão de cisalhamento (Pa)

MALH A	Velocidade de rotação (RPM)	Distância da parede adimensional y^+			Tensão de Cisalhamento (Pa)	
		Max. Face externa cupom	Mínimo (local)	Máximo (Local)	Mínimo	Máximo
A	100	9	0,488	23,04	0	0,629
A	300	22	1,3486	59,55	0,013	3,287
A	500	33	5,636	91,339	0,067	7,165
A	850	51	7.434	146.785	0,198	18,125
4	100	9	0,566	19,415	0	0,646
4	300	21	1,583	47,285	0	3,216
4	850	60	6,121	116,723	0,136	19,021

A Figura 59 e Figura 60 mostram a distribuição da tensão de cisalhamento e y^+ para a rotação de 100 rpm os valores da tensão de cisalhamento máximos se encontram nas bordas dos cupons, que pode ser explicado pelo ângulo de ataque no escoamento.

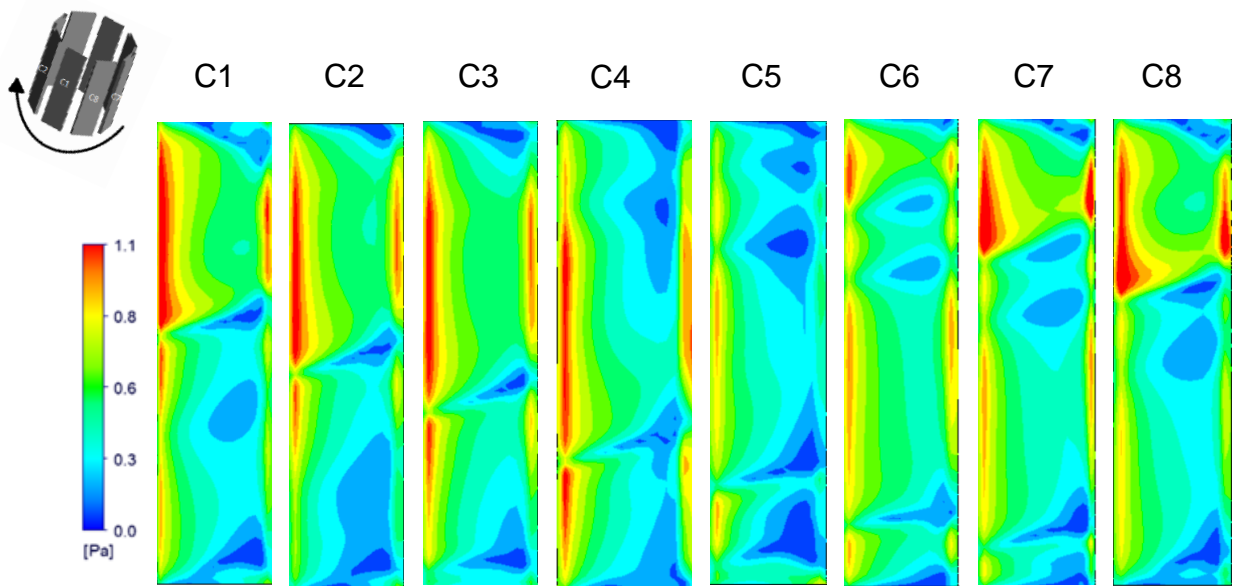


Figura 59: Distribuição da tensão de cisalhamento tanque ASTM G170 a 100 RPM.

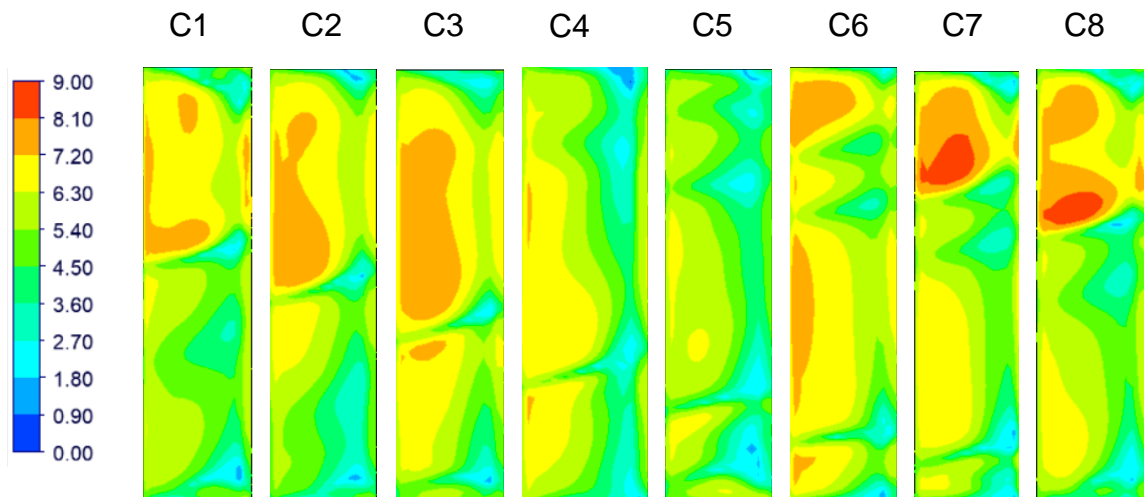


Figura 60: distribuição de y^+ para 100 rpm.

6.4. Análise da influência das janelas

Comparando os perfis de velocidade gerados para o tanque com janelas e tanque liso

Para avaliar a influência das janelas no escoamento foram simuladas duas versões do tanque: a original com janelas e uma sem janelas (tanque liso) para Re de 6722 (100 rpm). Figura 61 (tanque com janelas), nota-se que ao lado dos cupons os vetores mostram um vórtice fechado na altura da gaiola rotativa, diferente do tanque

liso, onde é possível visualizar o vórtice, porém parte do fundo do tanque até o topo. Outro ponto a se observar é o efeito da janela sobre o padrão que, apesar do escoamento passar por ela, é semelhante ao campo de velocidades do tanque liso, apresentando o vórtice partindo do fundo do tanque até o topo detalhado pelo retângulo verde. No fundo de ambos os reatores logo abaixo do impelidor apresenta-se uma região que pode prejudicar a suspensão de partículas levando a alterações nos resultados futuros para incrustação. Além disso

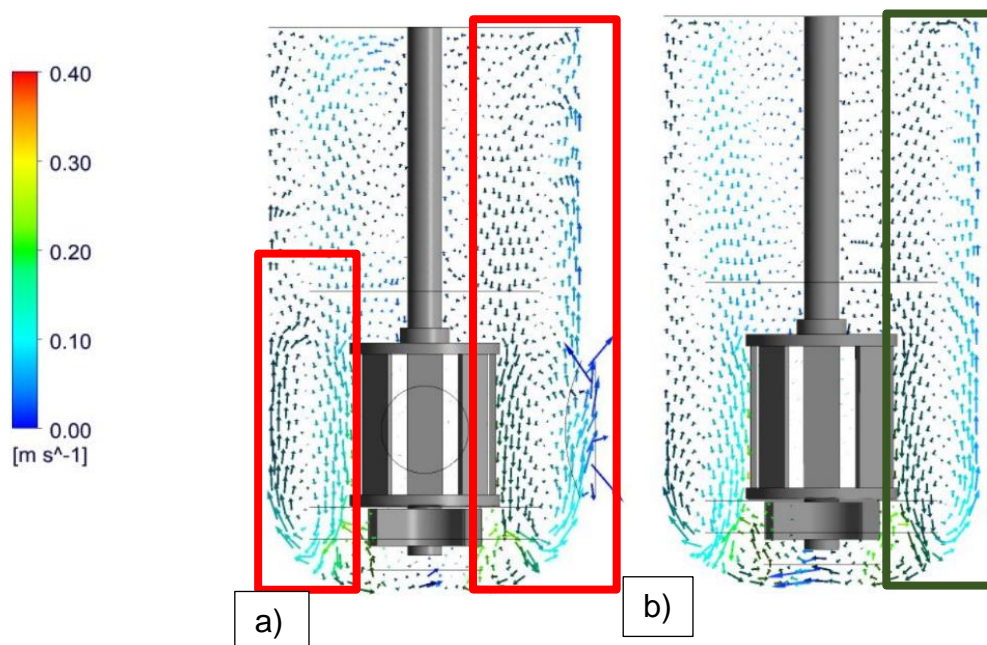


Figura 61: Perfil de velocidade. a) tanque original b) tanque liso

Figura 62 mostra os contornos de velocidade média ao longo da seção transversal localizada no meio da gaiola. Como esperado houve uma correlação linear positiva entre a velocidade angular, velocidade linear e a velocidade máxima que ocorre na vizinhança da gaiola rotativa. Apesar da presença da janela os perfis mostram similaridade.

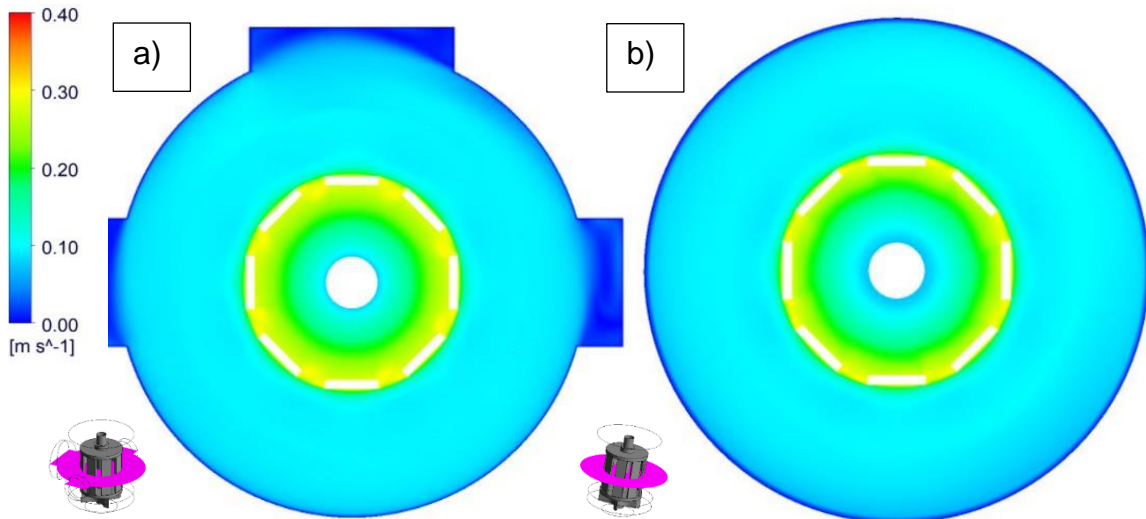


Figura 62: Contorno de velocidade média. a) tanque original b) tanque liso

Número de potência

A Figura 63 apresenta os números de potência para os tanques com janelas e liso. Comparando os resultados do número de potência, observa-se que os valores calculados para o tanque liso são levemente maiores (A Tabela 11 apresenta o comparativo quantitativo) para a maioria de Re , o que sugere que esta versão consome mais energia.

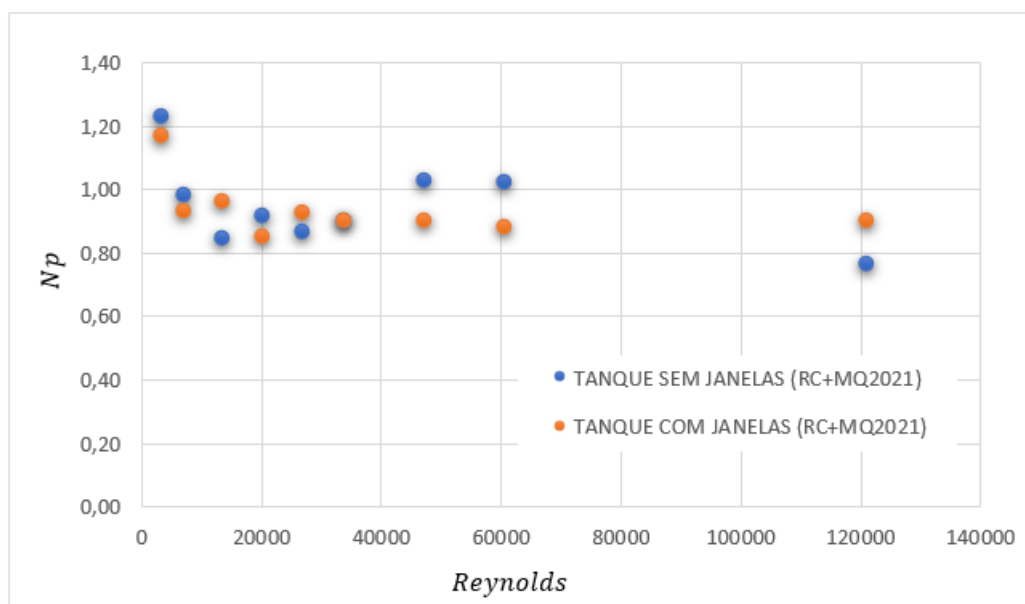


Figura 63: curva de potência das simulações com o tanque original e tanque liso.

Tabela 11: Comparativo quantitativo número de potência tanque liso x tanque com janelas

VELOCIDADE (RPM)	NÚMERO DE POTENCIA	
	TANQUE SEM JANELAS	TANQUE COM JANELAS
50	1,23	1,17
100	0,98	0,94
200	0,85	0,97
300	0,92	0,86
400	0,87	0,93
500	0,91	0,91
700	1,03	0,91
900	1,02	0,89
1800	0,77	0,91

Energia cinética turbulenta

Considerando a energia cinética turbulenta (Figura 64) gerados para $R_e = 6722$, na região lateral do impelidor é possível visualizar melhor dispersão dessa energia, resultando em uma maior homogeneização. Na lateral do impelidor do tanque liso é possível visualizar uma energia cinética turbulenta levemente superior ao tanque original.

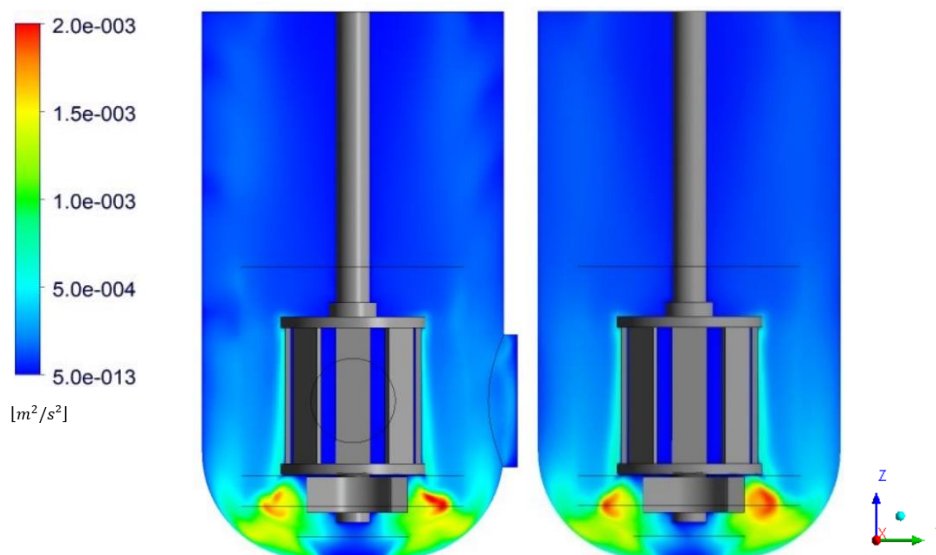


Figura 64: Energia cinética turbulenta. a) tanque original b) tanque liso

Tensão de cisalhamento

A Figura 65 mostra a comparação da tensão de cisalhamento para o tanque original e o tanque liso, ambos com RC e impelidor. Até a rotação de 500 rpm, o tanque liso apresentou quase que a mesma tensão de cisalhamento máxima, somente a partir de 700 rpm, o tanque liso apresentou maior tensão de cisalhamento.

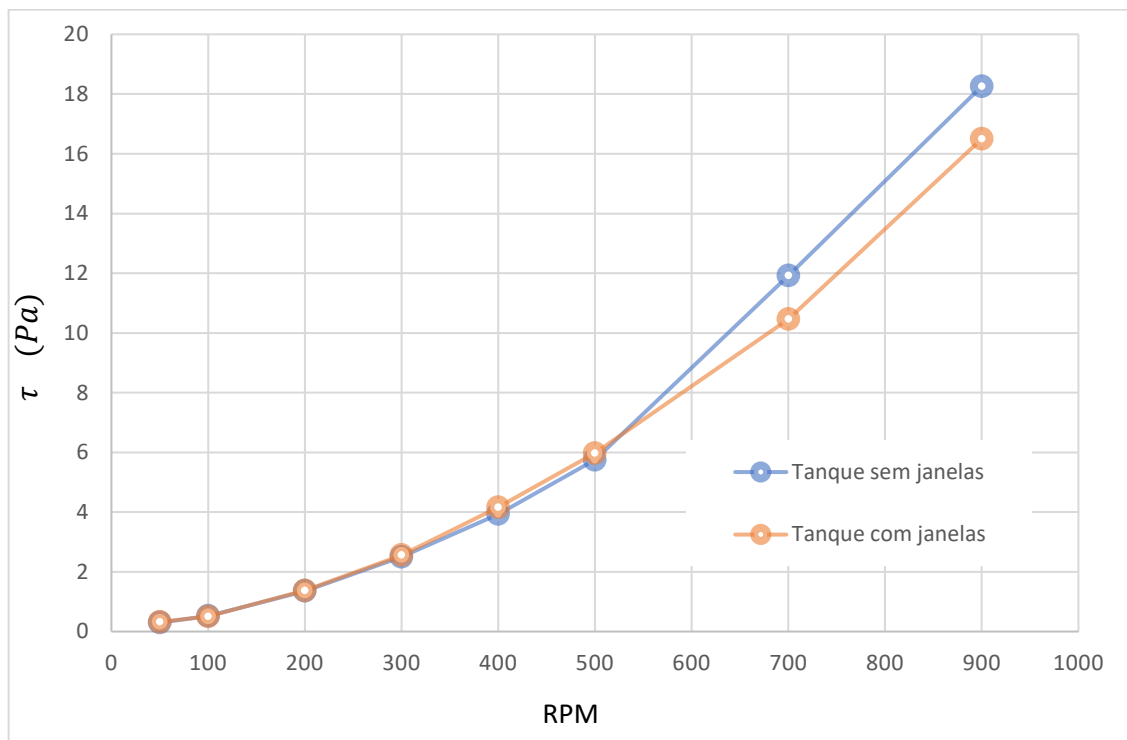


Figura 65: Comparação da tensão de cisalhamento máxima entre o Tanque original e tanque sem janelas nos

CUPONS.

6.5. ANÁLISE CFD tanque liso fabricado

Campo de velocidade

Analisando a hidrodinâmica no plano que passa pelo meio do tanque para Re de 6722 (100 rpm) observa-se que a gaiola rotativa desloca os vetores para o lateral do tanque e em seguida é direcionado para cima indo até o topo e posteriormente descendo formando um grande vórtice. Além disso, a distância da gaiola rotativa com

o fundo do tanque faz exista uma região de baixa velocidade em baixo da gaiola rotativa.

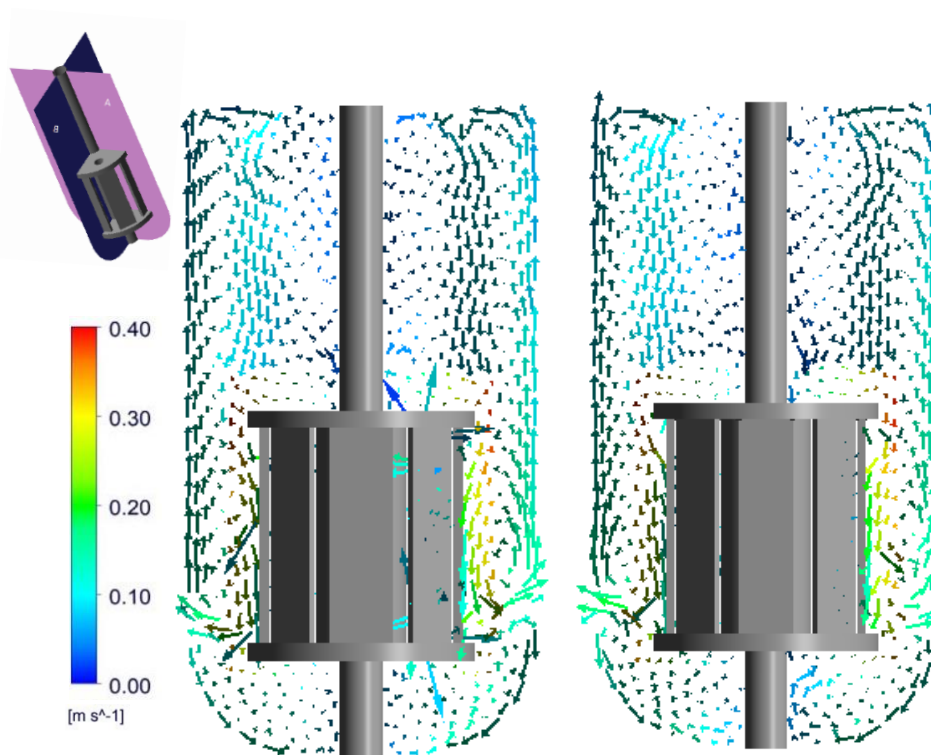


Figura 66: Campo de velocidade à 100 rpm para o tanque liso fabricado.

Contorno de velocidade

A Figura 67 mostra o perfil de velocidade à 100 rpm da seção transversal localizada no meio da gaiola. Como esperado a vizinhança dos cupons apresentaram velocidades maiores, isso é mostrado na Figura 68 no mesmo plano traçado para a velocidade de 100 rpm os vetores velocidade instantânea.

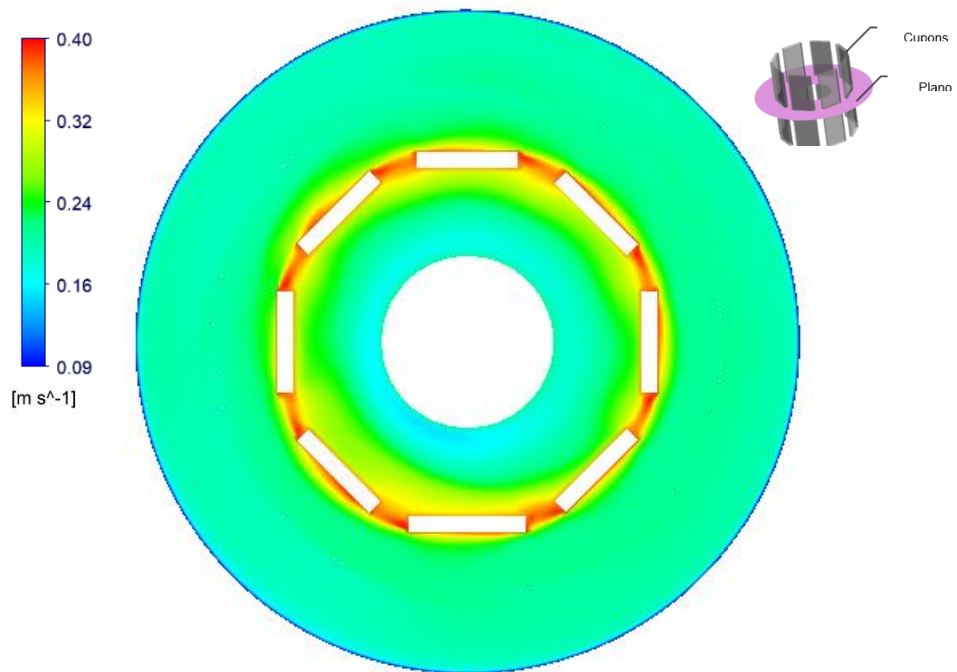


Figura 67: Contorno de velocidade à 100 rpm tanque liso sem impelidor.

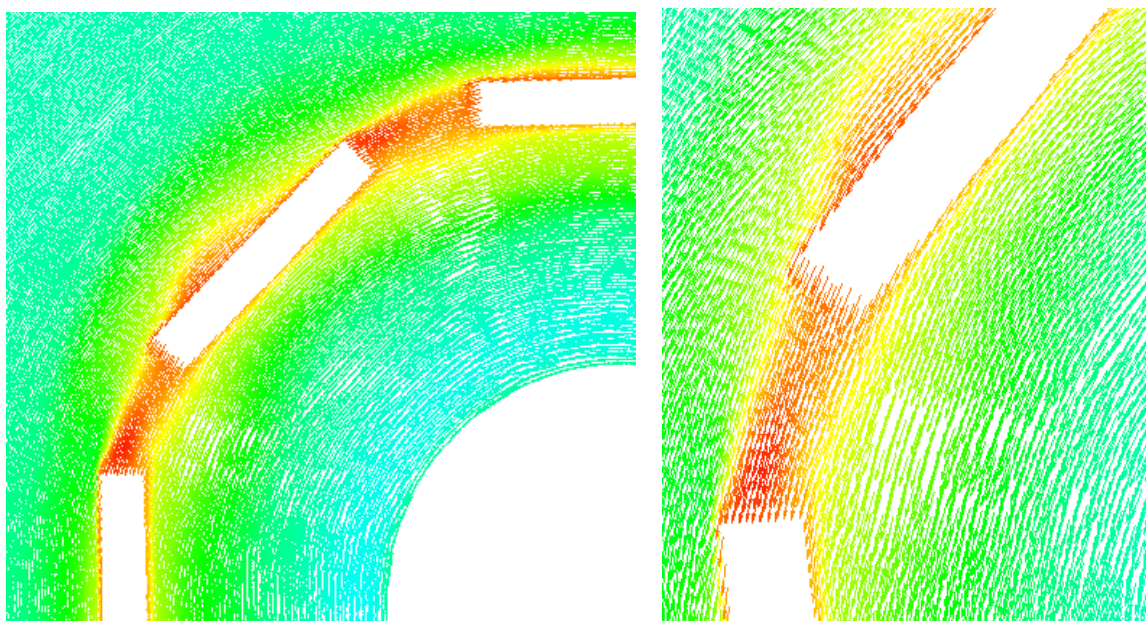


Figura 68: Vetor velocidade tanque liso sem impelidor à 100 rpm.

Energia cinética turbulenta

A distribuição da energia cinética turbulenta do tanque liso a 100 rpm mostra-se mais distribuída próximo a região dos cupons o que garante maior homogeneização nesta região. Já na parte superior e inferior a gaiola a homogeneização pode ser prejudicada. No qual em uma análise de incrustação os reagentes teriam maior dificuldade de se dispersar pelo tanque, prejudicando a incrustação.

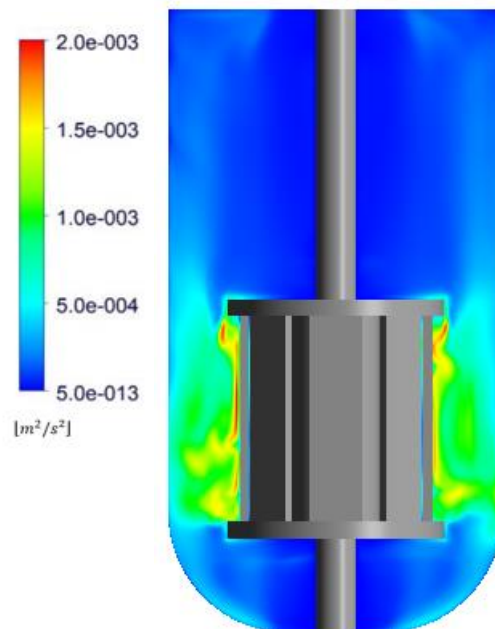


Figura 69: Energia cinética turbulenta para o tanque liso à 100 rpm.

Tensão de cisalhamento

Para a análise da distribuição da tensão de cisalhamento na superfície externa nos cupons, foi necessário antes análise da distância da parede adimensional y^+ , os valores encontrados aqui atendam a recomendação da ANSYS CFX, conforme mostrado na Figura 70.

A Figura 71 mostra a tensão de cisalhamento na face externa dos cupons, apresentando valores maiores nas bordas.

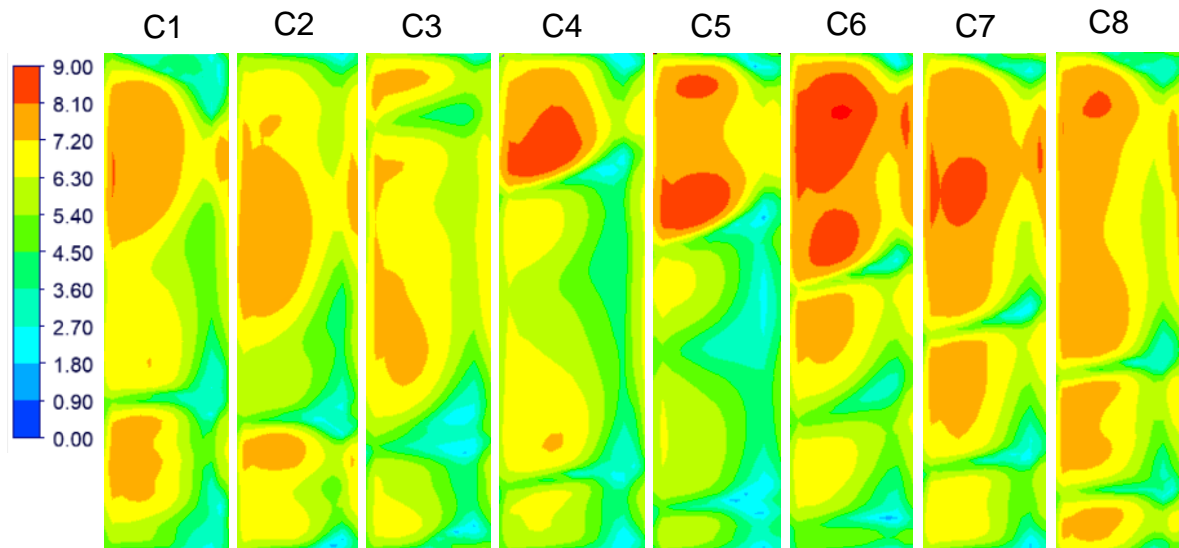


Figura 70: distribuição de y^+ para 100 rpm.

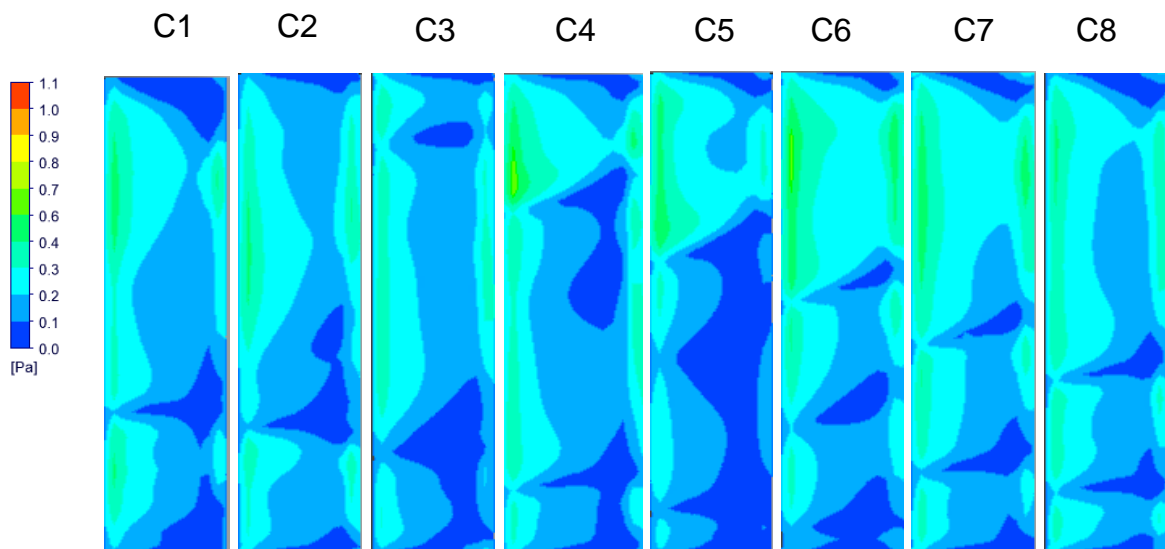


Figura 71: distribuição da tensão de cisalhamento tanque liso a 100 RPM.

6.6. Hidrodinâmica do sistema (tanque original)

Campo de velocidade

Analisando a hidrodinâmica do sistema, a Figura 72 mostra os perfis de velocidade em um plano que passa pelo meio do tanque para Re de 6722 (100 rpm), em uma vista lateral (à esquerda) e vista frontal (à direita). Observa-se que logo abaixo do impelidor há uma região de baixa velocidade, o que pode prejudicar a suspensão de sólidos e prejudicar a análise da cinética de incrustação, na região do impelidor o fluido é deslocado com uma inclinação para baixo em direção as paredes, e em seguida o fluido sobe. Para o plano da vista frontal há a presença de dois vórtices na lateral dos cupons (marcação em vermelho) e no lado esquerdo um vórtice maior partindo do fundo até o topo do reator. Já no plano da vista frontal apesar existir um pequeno vórtice ao lado dos cupons (marcação em amarelo) uma parcela de fluido é direcionada para cima e em seguida os vetores são direcionados para o topo do cupom.

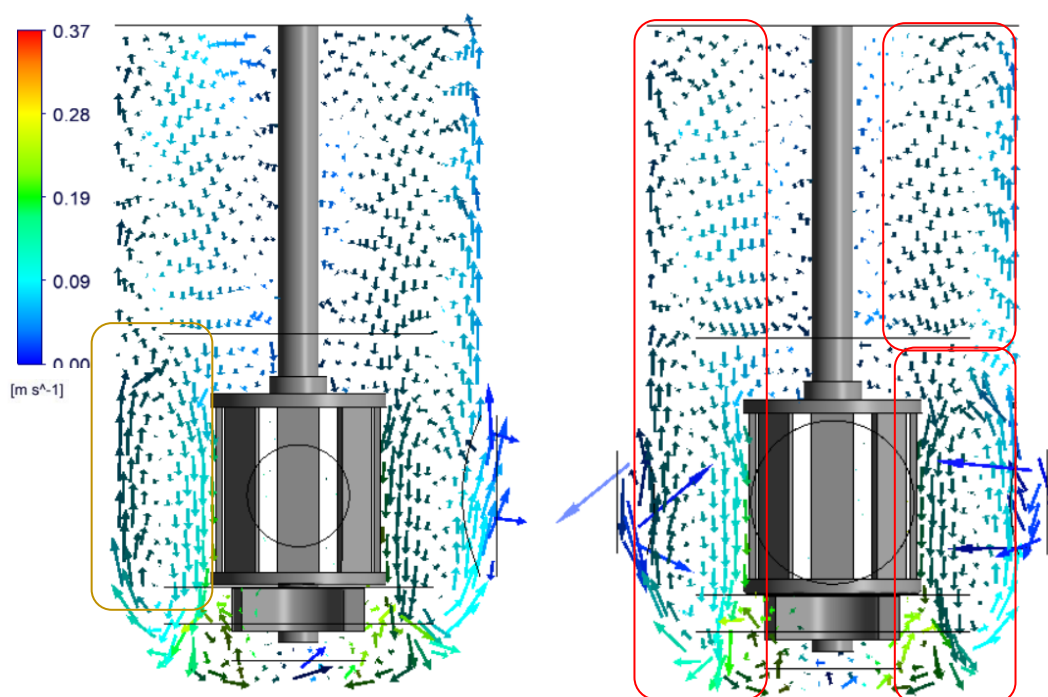


Figura 72: Perfil de velocidade. a) vista lateral b) vista frontal

Contorno de velocidade

A Figura 73 mostra o perfil de velocidade da seção transversal localizada no meio da gaiola. Como esperado houve uma correlação linear entre a velocidade angular e a velocidade linear. E a velocidade máxima ocorre na vizinhança dos cupons, o que era esperado.

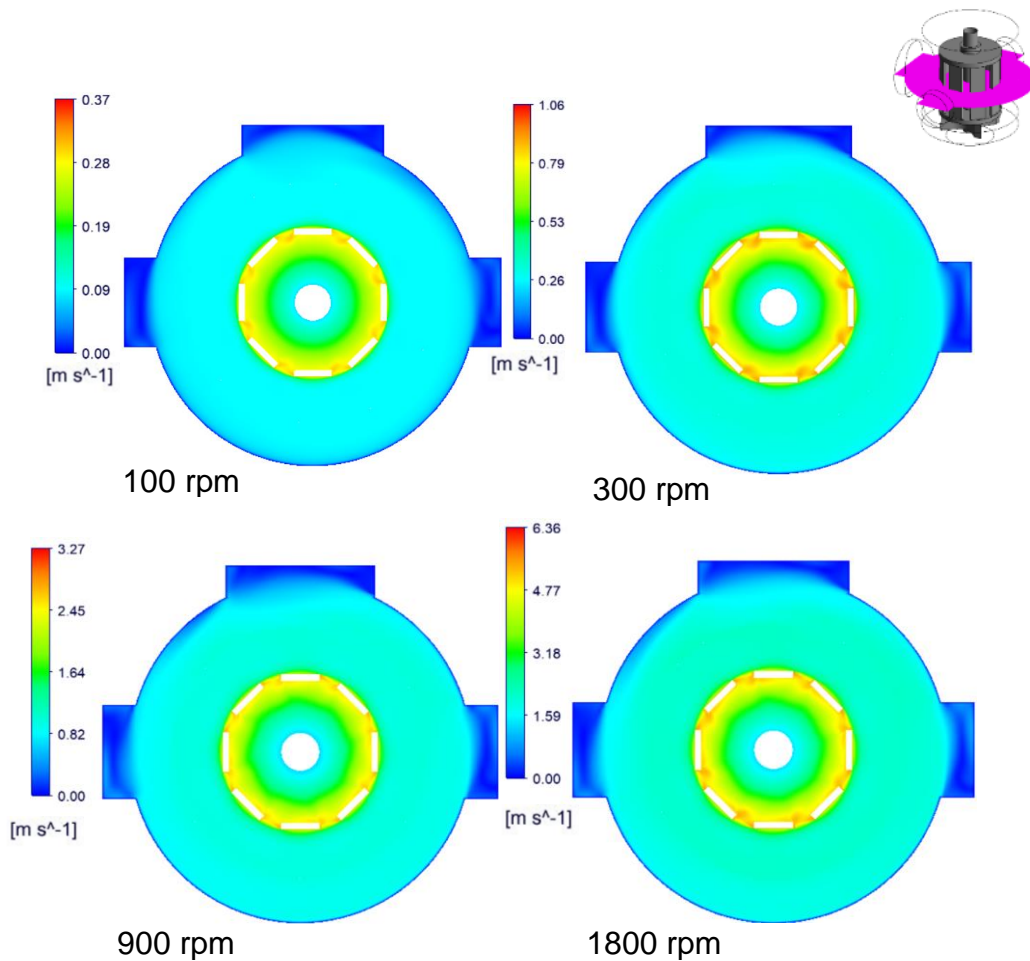


Figura 73: Contorno de velocidade para diferentes rotações.

Energia cinética turbulenta

A energia cinética turbulenta que atua na micromistura é importante em um processo de cristalização para garantir que os reagentes se dispersem pelo tanque. A maior energia cinética turbulenta está localizada próximo ao impelidor. De modo

geral, a energia cinética não está bem distribuída, além disso na região abaixo do impelidor pode criar uma região de escoamento não homogêneo.

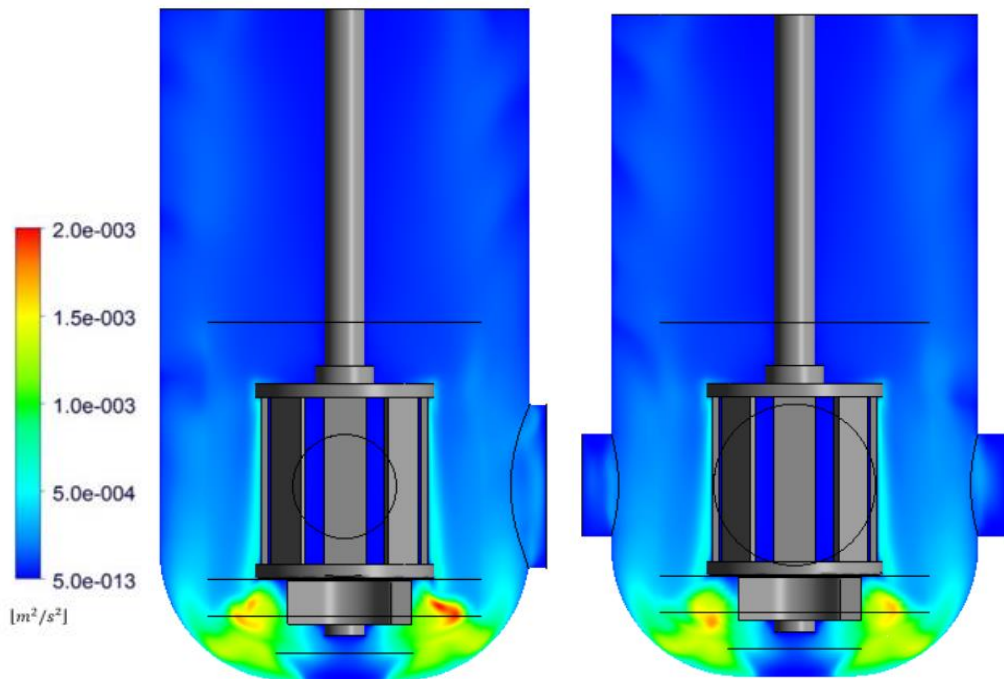


Figura 74: Energia cinética turbulenta. a) vista frontal b) vista lateral

6.7. Análise experimental para os reatores fabricados

Os experimentos para análise do vórtice de superfície livre foram realizados para as rotações de 100, 300, 500 e 600 rpm, tanto para o tanque liso (sem impelidor) quanto para o tanque ASTM G170. Um aumento da velocidade de rotação da gaiola resultou em um aumento na profundidade do vórtice e uma maior dispersão do gás. Além disso, o aumento da velocidade intensificou a quebra de bolhas e causou alta densidade de bolhas em toda região. Em 100 rpm, a interface ar e água está relativamente plana e com o aumento da velocidade, percebe-se o aumento do vórtice para ambos os tanques. O tanque liso apresentou um vórtice levemente maior que o ASTM G170 a partir de 300 rpm e menor dispersão de gás. Além disso, nos

experimentos foi possível perceber para as velocidades de 300 até 600 rpm o vórtice maior tanque liso, como também maior vibração quando comparado ao tanque ASTM.

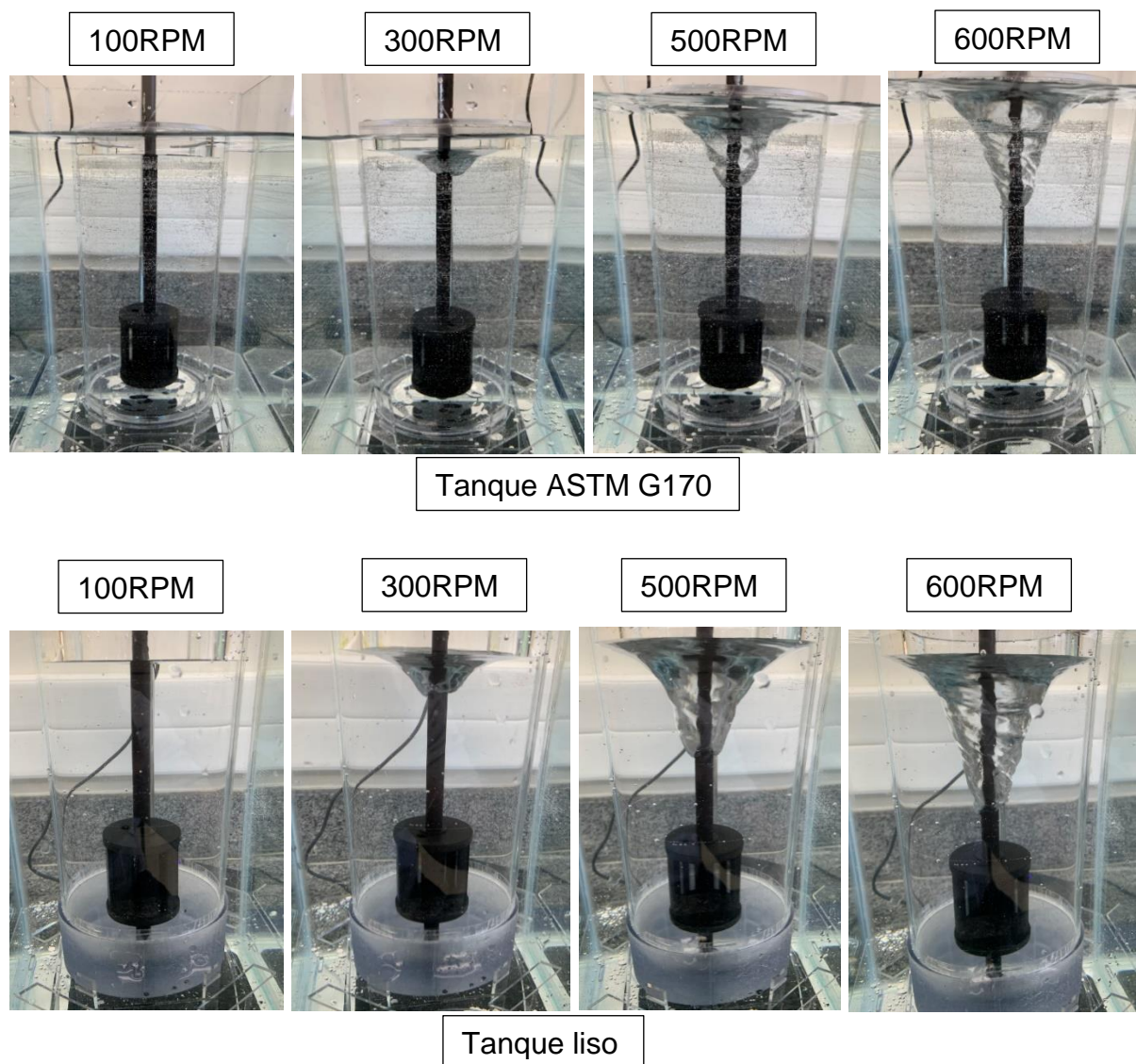


Figura 75: Fotografias instantâneas da forma do vórtice para o tanque liso e ASTM G170.

7. CONCLUSÃO

Os resultados encontrados aqui permitiram prever que as janelas não influenciam no comportamento hidrodinâmico, como também na tensão de cisalhamento para as rotações até 600 RPM. Para rotações superiores é necessário auxílio experimental, visto que nos testes experimentais dos tanques fabricados houve muita vibração e dispersão de gases o que pode tornar-se complexo na análise CFD.

Nas simulações analisadas do tanque original, observa-se que a região em baixo do impelidor apresenta vetores com baixa velocidade, o que pode influenciar na suspensão de sólidos, prejudicando a análise de incrustação. Este fator piora quando se retira o impelidor do sistema.

Ao comparar o tanque original (RC + MQ2021), tanque ASTM G170 e tanque liso fabricado (somente o RC) nos aspectos de comportamento hidrodinâmico, tensão de cisalhamento e suspensão de partículas, o tanque ASTM G170 se destaca. Porém tal afirmação deve ser confirmada em testes experimentais com auxílio da velocimetria por imagem de partícula.

REFERÊNCIAS

ABU-ZAID, M. A fouling evaluation system for industrial heat transfer equipment subject to fouling. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, v. 27, n. 6, p. 815–824, ago. 2000.

ALONZO-GARCIA, A. et al. On the Performance of Different Rans Based Models to Describe the Turbulent Flow in an Agitated Vessel Using Non-Structured Grids and PIV Validation. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 36, n. 1, p. 361–382, mar. 2019.

RUNSTEDTLER, A.; Jinxing Huang, Patrick Boisvert, Nicholas Senior; Parametric Wall Shear Stress Characterization of the Rotating Cage Test Method. *CORROSION* 1 Jun. 2019.

ALVES, C. A. et al. Effect of Temperature on Asphaltenes Precipitation: Direct and Indirect Analyses and Phase Equilibrium Study. *Energy & Fuels*, v. 33, n. 8, p. 6921–6928, 15 ago. 2019.

ANSYS CFX. *Ansys Help: CFX theory guide v.15.0*. 2014.

ANSYS FLUENT. *Ansys Help: FLUENT theory guide v.15.0*. 2014

ATKINS, M. D. Chapter 5 - Velocity Field Measurement Using Particle Image Velocimetry (PIV). In: KIM, T.; LU, T. J.; SONG, S. J. (Eds.). . *Application of Thermo-Fluidic Measurement Techniques*. [s.l.] Butterworth-Heinemann, 2016. p. 125–166.
ASTM INTERNATIONAL, “G184 Standart Praticce for Evaluating and Qualifying Oil Field and Refinery Corrosion Inhibitors Using Rotating Cage”, 2006.

AUBIN, J.; FLETCHER, D. F.; XUEREBA, C. Modeling turbulent flow in stirred tanks with CFD: the influence of the modeling approach, turbulence model and numerical scheme. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 28, n. 5, p. 431–445, abr. 2004.
CHENG, D. et al. Numerical simulation of macro-mixing in liquid–liquid stirred tanks. *Chemical Engineering Science*, v. 101, p. 272–282, set. 2013.

CHENG, J. et al. CFD Modeling of Nucleation, Growth, Aggregation, and Breakage in Continuous Precipitation of Barium Sulfate in a Stirred Tank. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 48, n. 15, p. 6992–7003, 5 ago. 2009.

CORTADA-GARCIA, M. et al. Computational fluid dynamic studies of mixers for highly viscous shear thinning fluids and PIV validation. *Chemical Engineering Science*, v. 179, p. 133–149, abr. 2018.

DEGLON, D. A.; MEYER, C. J. CFD modelling of stirred tanks: Numerical considerations. *Minerals Engineering*, v. 19, n. 10, p. 1059–1068, ago. 2006.

DROGUETT, E. L. et al. Variable selection and uncertainty analysis of scale growth rate under pre-salt oil wells conditions using support vector regression: *Proceedings of*

the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 14 maio 2014.

DUAN, X. et al. Numerical simulation of reactive mixing process in a stirred reactor with the DQMOM-IEM model. *Chemical Engineering Journal*, v. 360, p. 1177–1187, mar. 2019.

EFRID K. D., "Flow Effects on Corrosion," em *Uhligs Corrosion Handbook*, 2011.

EMANI, S. et al. Effect of operating conditions on crude oil fouling through CFD simulations. *International Journal of Heat and Technology*, v. 35, n. 4, p. 1034–1044, 30 dez. 2017.

GAO, X. et al. Offshore oil production planning optimization: An MINLP model considering well operation and flow assurance. *Computers & Chemical Engineering*, v. 133, p. 106674, fev. 2020.

GARCÍA-CORTÉS, D.; JÁUREGUI-HAZA, U. Hydrodynamics in stirred vessels with flat-bladed disk-style turbine. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, n. 38, p. 97–113, set. 2006.

GÓMEZ, RUBEN RAMIREZ; ALONSO, ALEJANDRO; GONZALEZ, MARGARITA M. Performance Evaluation of Two High-Shear Impellers in an Unbaffled Stirred Tank - Ramírez-Gómez - 2015 - *Chemical Engineering & Technology* - Wiley Online Library. Disponível em: <<https://onlinelibrary-wiley.ez43.periodicos.capes.gov.br/doi/10.1002/ceat.201400792>>. Acesso em: 12 mar. 2020.

GONZÁLEZ-NERIA, I. et al. PIV and dynamic LES of the turbulent stream and mixing induced by a V-grooved blade axial agitator. *Chemical Engineering Journal*, v. 374, p. 1138–1152, out. 2019.

Graham, Gordon M., Thomson, Hunter , Bowering, Deborah , and Robert Stalker. "Correlation of Shear and Turbulence on Scale Formation and Inhibition." Paper presented at the SPE International Oilfield Scale Conference and Exhibition, Aberdeen, Scotland, May 2014

HALL, J. F. et al. Mixing in Unbaffled High-Throughput Experimentation Reactors. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 43, n. 15, p. 4149–4158, 1 jul. 2004.
HARTMANN, H.; DERKSEN, J. J.; VAN DEN AKKER, H. E. A. Mixing times in a turbulent stirred tank by means of LES. *AIChE Journal*, v. 52, n. 11, p. 3696–3706, 1 nov. 2006.

Hirano, Susumu, Sunaba, Toshiyuki, and Takashi Ito. "Evaluation of Corrosion Inhibitor With High Speed Rotating Cage." Paper presented at the CORROSION 2018, Phoenix, Arizona, USA, April 2018.

HO, T. C. A study of crude oil fouling propensity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 95, p. 62–68, abr. 2016.

JAHODA, M.; TOMÁŠKOVÁ, L.; MOŠTĚK, M. CFD prediction of liquid homogenisation in a gas–liquid stirred tank. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 87, n. 4, p. 460–467, abr. 2009.

JAKOBSEN, HUGO A. *Chemical Reactor Modeling*. Norwegian Univ. of Science & Technology: Springer, 2008.

JAWORSKI, Z.; NIENOW, A. W. CFD modelling of continuous precipitation of barium sulphate in a stirred tank. *Chemical Engineering Journal*, v. 91, n. 2–3, p. 167–174, mar. 2003.

JESÚS, GASTON MARTINEZ et al. Computational Fluid Dynamics Study of Flow Induced by a Grooved High-Shear Impeller in an Unbaffled Tank - Martínez-de Jesús - 2018 - *Chemical Engineering & Technology* - Wiley Online Library. Disponível em: <<https://onlinelibrary-wiley.ez43.periodicos.capes.gov.br/doi/full/10.1002/ceat.201700091>>. Acesso em: 12 mar. 2020.

JOSHI, J. B. et al. Bubble generated turbulence and direct numerical simulations. *Chemical Engineering Science*, v. 157, p. 26–75, jan. 2017.

JUNGBECKER, P.; VEIT, D. 5 - Computational fluid dynamics (CFD) and its application to textile technology. In: VEIT, D. (Ed.). *Simulation in Textile Technology*. Woodhead Publishing Series in Textiles. [s.l.] Woodhead Publishing, 2012. p. 142–178e.

KAMAL, M. S. et al. Oilfield scale formation and chemical removal: A review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 171, p. 127–139, dez. 2018.

LAMBERTO, D. J.; ALVAREZ, M. M.; MUZZIO, F. J. Experimental and computational investigation of the laminar flow structure in a stirred tank. *Chemical Engineering Science*, v. 54, n. 7, p. 919–942, abr. 1999.

LEE, N. et al. Identification and understanding of fouling in low-pressure membrane (MF/UF) filtration by natural organic matter (NOM). *Water Research*, v. 38, n. 20, p. 4511–4523, dez. 2004.

LI, G. et al. Particle image velocimetry experiments and direct numerical simulations of solids suspension in transitional stirred tank flow. *Chemical Engineering Science*, v. 191, p. 288–299, dez. 2018.

LI, L.; XIANG, K.; XIANG, B. Numerical simulation of transient power consumption characteristics in an unbaffled stirred tank. *Chemical Papers*, 7 mar. 2020.

LI, L.; XU, B. Numerical simulation of hydrodynamics in an uncovered unbaffled stirred tank. *Chemical Papers*, v. 71, n. 10, p. 1863–1875, 1 out. 2017.

LIANG, Y. et al. Turbulent flow field in a stirred vessel agitated by an Impeller with flexible blades. *AIChE Journal*, v. 64, n. 11, p. 4148–4161, 1 nov. 2018.

Liu, Y., Zhang, Z., Bhandari, N., Yan, F., Zhang, F., Ruan, G., Dai, Z., Alsaieri, H. A., Lu, A. Y., Deng, G., Kan, A. T., and M. B. Tomson. "Iron Sulfide Precipitation and Deposition under Different Impact Factors." Paper presented at the SPE International Conference on Oilfield Chemistry, Montgomery, Texas, USA, April 2017

LV, Y.; LIU, M.; XU, Y. Corrosion and Fouling Behaviors on Modified Stainless Steel Surfaces in Simulated Oilfield Geothermal Water. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, v. 54, n. 3, p. 526–535, 1 maio 2018.

MAO, Z.; YANG, C. Micro-mixing in chemical reactors: A perspective. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, v. 25, n. 4, p. 381–390, abr. 2017.

MENDOZA, F. et al. Hydrodynamics in a stirred tank in the transitional flow regime. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 132, p. 865–880, abr. 2018.

MIRANDA, M. A. C. Utilização de Velocimetria por Imagem de Partícula na Visualização e Caracterização de Escoamento Bifásico. UFSC, Florianópolis - SC: [s.n.].

MONTANTE, G. et al. Numerical simulations of the dependency of flow pattern on impeller clearance in stirred vessels. *Chemical Engineering Science*, p. 20, 2001.

MOUSAVI, S. E.; CHOUDHURY, M. R.; RAHAMAN, MD. S. 3-D CFD-PBM coupled modeling and experimental investigation of struvite precipitation in a batch stirred reactor. *Chemical Engineering Journal*, v. 361, p. 690–702, abr. 2019.

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, n. 22, p. 5468–5495, nov. 2008.

Nichols, David A., Frigo, Dario M., and Gordon M. Graham. "Advances in Understanding Effects of Shear and Turbulence on Scale Formation, Adhesion and Growth on Surfaces." SPE International Oilfield Scale Conference and Exhibition, Aberdeen, Scotland, UK, May 2016.

OCHIENG, A.; ONYANGO, M. CFD simulation of the hydrodynamics and mixing time in a stirred tank. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, v. 16, n. 4, p. 379–386, 2010.

PAN, X. et al. LES and PIV investigation of turbulent characteristics in a vessel stirred by a novel long-short blades agitator. *Chemical Engineering Science*, v. 176, p. 343–355, fev. 2018.

PATIL, P. D. et al. Fouling Diagnosis of Pennsylvania Grade Crude Blended with Opportunity Crude Oils in a Refinery Crude Unit's Hot Heat Exchanger Train. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 58, n. 38, p. 17918–17927, 25 set. 2019.

PERRARD, M. et al. Characterisation of the Turbulence in a Stirred Tank Using Particle Image Velocimetry. In: 10th European Conference on Mixing. [s.l.] Elsevier, 2000. p. 345–352.

PETKOVIC, B.; WATKINSON, P. Fouling of a Heated Rod in a Stirred Tank System. *Heat Transfer Engineering*, v. 35, n. 3, p. 302–310, 11 fev. 2014.

PRAKASH, B. et al. Vortex shape and gas-liquid hydrodynamics in unbaffled stirred tank. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 97, n. 6, p. 1913–1920, 1 jun. 2019.

QU, Z. et al. Methodology for removing fouling within liquid-filled pipelines based on ultrasonic guided waves cavitation effect. *Applied Acoustics*, v. 157, p. 107018, jan. 2020.

P. Ramachandran, “Numerical Simulation of the Rotating Cage Problem,” 33rd National and 3rd International Conference on Fluid Mechanics and Fluid Power, paper no. NCFMFP2006-1202 (ASME, 2006), pp. 1-9.

RANADE, V. V. et al. Trailing Vortices of Rushton Turbine. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 79, n. 1, p. 3–12, jan. 2001.

REIS, M. I. P. et al. Deposição Mineral em Superfícies: Problemas e Oportunidades na Indústria do Petróleo. *Revista Virtual de Química*, v. 3, n. 1, p. 2–13, 5 abr. 2011.

RIBEIRO, D. C. Modelagem e simulação do escoamento de sistemas multifásicos em reatores agitados mecanicamente. 2012, 206p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal De Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

ROSA, C. M. DA et al. Comportamento de reagentes inibidores de incrustação aplicados na perfuração de poços de petróleo. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 20, n. 2, p. 514–522, jun. 2015.

SANTANA, C. J.; MANZELA, M. A. A. Incrustações Inorgânicas em Campos do Pré-Sal. *C. J.*, p. 10, 2017.

SCHÄFER, A. I.; FANE, A. G.; WAITE, T. D. Fouling effects on rejection in the membrane filtration of natural waters. *Desalination*, v. 131, n. 1–3, p. 215–224, dez. 2000.

SHENG, J.; MENG, H.; FOX, R. O. Validation of CFD simulations of a stirred tank using particle image velocimetry data. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 76, n. 3, p. 611–625, jun. 1998.

Schmitt, G., and Bakalli, M. “A critical review of measuring techniques for corrosion rates under flow conditions”. In *Proceedings of the 61st NACE conference on corrosion*, NACE International, 2006.

SHIRAZI, S.; LIN, C.-J.; CHEN, D. Inorganic fouling of pressure-driven membrane processes — A critical review. *Desalination*, v. 250, n. 1, p. 236–248, jan. 2010.

SU, T. et al. Characterization on the hydrodynamics of a covering-plate Rushton impeller. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, v. 26, n. 6, p. 1392–1400, jun. 2018.

SOPHIA, L. V. G. Análise comparativa das alternativas para simulação CFD de tanque de mistura operando em regime turbulento. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) Centro Universitário Da Fei, São Bernardo do Campo, 2010.

TAGHAVI, M.; MOGHADDAS, J. Using PLIF/PIV techniques to investigate the reactive mixing in stirred tank reactors with Rushton and pitched blade turbines. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 151, p. 190–206, nov. 2019.

TAMBURINI, A. et al. Solid–Liquid Suspensions in Top-Covered Unbaffled Vessels: Influence of Particle Size, Liquid Viscosity, Impeller Size, and Clearance. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 53, n. 23, p. 9587–9599, 11 jun. 2014.

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

TANG, W. et al. The scaling mechanism of glass fiber reinforced plastics pipeline. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 159, p. 522–531, nov. 2017.

TEIXEIRA, T. P. et al. Inorganic scale thickness prediction in oil pipelines by gamma-ray attenuation and artificial neural network. *Applied Radiation and Isotopes*, v. 141, p. 44–50, nov. 2018.

TRAD, Z. et al. Mixing and liquid-to-gas mass transfer under digester operating conditions. *Chemical Engineering Science*, v. 170, p. 606–627, out. 2017a.

TRAD, Z. et al. Experimental and numerical investigation of hydrodynamics and mixing in a dual-impeller mechanically-stirred digester. *Chemical Engineering Journal*, v. 329, p. 142–155, dez. 2017b.

VAZIRIAN, M. M. et al. Surface inorganic scale formation in oil and gas industry: As adhesion and deposition processes. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 137, p. 22–32, jan. 2016.

Vera, Jose Rafael, Parsi, Mazdak, Kara, Mustafa, Sharma, Partha, Li, Xiaoji, and Anchal Jatale. "Appropriate Rotating Cage Speed for Testing Inhibitors under Field Simulated Flow Conditions." Paper presented at the CORROSION 2017, New Orleans, Louisiana, USA, 2017.

VISSER, J.; JEURNINK, TH. J. M. Fouling of heat exchangers in the dairy industry. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 14, n. 4, p. 407–424, maio 1997.

WANG, L. et al. Experimental investigation and CFD simulation of liquid–solid–solid dispersion in a stirred reactor. *Chemical Engineering Science*, v. 65, n. 20, p. 5559–5572, out. 2010.

YANG, J. et al. Crude Oil Fouling: Fluid Dynamics, Reactions and Phase Change. *Procedia IUTAM*, v. 15, p. 186–193, 2015.

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

YOSHIDA, M. et al. Design and operation of unbaffled vessels agitated with an unsteadily forward–reverse rotating impeller handling solid–liquid dispersions. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, v. 7, n. 4, p. 572–580, 2012.

ZAMIRI, A.; CHUNG, J. T. Numerical evaluation of turbulent flow structures in a stirred tank with a Rushton turbine based on scale-adaptive simulation. *Computers & Fluids*, v. 170, p. 236–248, jul. 2018.

ZHOU, Y. et al. Investigation on the Flow Field and Mixing Efficiency of a Stirred Tank Equipped with Improved Intermig Impellers. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, v. 17, n. 11, 9 ago. 2019.

ZHU, Z. et al. Multi-dimensional analysis of turbulence models for immiscible liquid-liquid mixing in stirred tank based on numerical simulation. *Separation Science and Technology*, 17 jan. 2020.

ZLOKAMIK, MARKO. *Stirring, Theory and Practice*. Germany: Wiley-VCH, 2001.

ZWIETERING, TH. N. Suspending of solid particles in liquid by agitators. *Chemical Engineering Science*, v. 8, n. 3–4, p. 244–253, jun. 1958.