



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade De Engenharia Química

NAYLA XIOMARA LOZADA GARCÍA

SIMULAÇÃO DA MISTURA DE CARBOPOL E GLICEROL EM UM MISTURADOR
ESTÁTICO HELICOIDAL, COM O USO DE CFD.

Campinas
2018

NAYLA XIOMARA LOZADA GARCÍA

SIMULAÇÃO DA MISTURA DE CARBOPOL E GLICEROL EM UM MISTURADOR
ESTÁTICO HELICOIDAL, COM O USO DE CFD.

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do Título de Mestra em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Nunhez

Este exemplar corresponde à versão final da dissertação defendida pela aluna Nayla Xiomara Lozada García, e orientada pelo Prof. Dr. José Roberto Nunhez.

Campinas

2018

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): Não se aplica.

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

L959s Lozada García, Nayla Xiomara, 1991-
Simulação da mistura de carbopol e glicerol em um misturador estático helicoidal, com o uso de CFD / Nayla Xiomara Lozada García. – Campinas, SP : [s.n.], 2018.

Orientador: José Roberto Nunhez.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Óleo pesado. 2. Fluidodinâmica computacional (CFD). 3. Fluidos newtonianos. 4. Fluidos não newtonianos. 5. Mistura. I. Nunhez, José Roberto, 1961-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Simulation of the carbopol and glycerol mixture in a helical static mixer with the use of CFD

Palavras-chave em inglês:

Heavy oil

Computational fluid dynamics (CFD)

Newtonian fluids

Non newtonian fluids

Mixing

Área de concentração: Engenharia Química

Titulação: Mestra em Engenharia Química

Banca examinadora:

José Roberto Nunhez [Orientador]

Efraim Cekinski

Guilherme José de Castilho

Data de defesa: 31-07-2018

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Química

Dissertação de mestrado defendida pela aluna Nayla Xiomara Lozada García e aprovada em 31 de Julho de 2018 pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof. Dr. José Roberto Nunhez
FEQ/UNICAMP

Prof. Dr. Efraim Cekinski
Instituto de Pesquisa Tecnológica do estado de São Paulo

Prof. Dr. Guilherme José de Castilho
FEQ/UNICAMP

A ata de defesa, assinada pelos membros da Comissão Examinadora, consta no processo de vida acadêmica da aluna.

*Para Diomar, José, Oscar e Renato:
Gracias por hacer parte de este camino a pesar de la distancia.*

Agradecimentos

Agradeço

A Deus, pela vida, as capacidades e cada uma das oportunidades que dia a dia me brinda.

A meus pais e meu irmão por que são minha inspiração, minha motivação e minha força.

A quem é minha fortaleza e apoio incondicional ainda à distancia.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Roberto Nunhez pelos conhecimentos compartilhados e a confiança durante o desenvolvimento deste projeto.

Aos meus colegas do laboratório L-CFD pelos momentos compartilhados dia a dia.

A todos aqueles que contribuíram para concluir com sucesso este projeto.

Resumo

A qualidade da mistura de fluidos em um processo químico é importante quando se deseja melhorar as características do produto final. Dependendo do tipo de fluido, o processo de mistura pode apresentar dificuldades, como é o caso dos fluidos não newtonianos ou fluidos newtonianos com altas viscosidades. Os misturadores estáticos são amplamente utilizados na mistura de fluidos newtonianos e não newtonianos. Estes equipamentos permitem obter misturas com alto grau de homogeneização e quedas de pressão moderadas. O presente trabalho analisa o grau de homogeneização dos fluidos newtonianos na mistura de uma solução aquosa de Glicerol 80% p/p e a mistura de um óleo pesado (16°API) com um óleo leve (28,3°API), estes últimos utilizados no processo de diluição de óleo pesado. De igual forma é estudado o grau de homogeneização dos fluidos não newtonianos na mistura de uma solução aquosa de Carbopol 940 0,1% p/p e a mistura de uma solução aquosa de Carbopol 940 0,1% p/p e Carbopol 940 0,2% p/p. A simulação da mistura dos fluidos realizou-se em um misturador estático helicoidal. O Coeficiente de Variação (CoV), a queda de pressão em relação ao fator K_L e a velocidade analisaram-se para as misturas propostas. O CoV para as misturas dos fluidos newtonianos atingiu um valor $\leq 0,05$ com 14 elementos de mistura. No caso dos fluidos não newtonianos o valor $\leq 0,05$ foi atingido com 14 e 16 elementos de mistura. Os valores do fator K_L foram comparados com o valor de K_L comercial para o misturador estático helicoidal. As diferenças entre estes valores encontram-se em torno de 2% para os fluidos newtonianos. A direção na rotação dos elementos estáticos tem sido estudada considerando a influência no CoV final. Esta rotação da geometria proporciona um padrão de fluxo diferente que permite obter uma variação de CoV desde 0,283 para 0,156 no caso do Glicerol e desde 0,244 para 0,197 no caso dos hidrocarbonetos para um comprimento de $L/D = 21$ (6 elementos de mistura). O modelo de simulação proposto considera um fluido multicomponente em regime laminar e é desenvolvido utilizando a Fluidodinâmica Computacional (CFD). Os resultados obtidos compararam-se com resultados encontrados na literatura, apresentando proximidade. O uso do misturador estático helicoidal na mistura de hidrocarbonetos mostrou resultados adequados obtendo um valor de $CoV = 0,034 (\leq 0,05)$

permitindo inferir que o uso do misturador estático helicoidal poderia ser uma alternativa para a mistura de hidrocarbonetos no processo de diluição de óleo pesado.

Palavras-chave: misturador estático, Fluidodinâmica Computacional (CFD), fluido Newtoniano, fluido não Newtoniano, diluição de óleo pesado, óleo pesado.

Abstract

The quality of the fluid mixture in chemical processes is important when it is necessary to improve the characteristics of final product. Depending on the type of fluid, the mixture process can present difficulties, as is the case of no Newtonian fluids and Newtonian fluids with high viscosities. Static mixers are widely used in mixture of Newtonian fluids and no Newtonian fluids. This equipment allows obtaining high homogenization with a moderate pressure drop. The aim of this work is to analyze the homogenization degree of Newtonian fluids in a mixture of an aqueous solution of Glycerol 80% p/p and a mixture of heavy oil (16°API) with light oil (28.3°API) (in the heavy oil dilution process). Similarly, it is studying the homogenization degree of no Newtonian fluids in a mixture of an aqueous solution of Carbopol 940 0.1% p/p and a mixture of an aqueous solution of Carbopol 940 0.1% p/p and Carbopol 940 0.2% p/p. The simulation of the mixtures was performed in a helical static mixer. The Coefficient of Variation CoV, the pressure drop in function of the K_L factor and the velocity was analyzed for the propose mixtures. The CoV for the Newtonian fluids mixture reached a value ≤ 0.05 with 14 mixer elements. In the case of no the Newtonian fluids, the $CoV \leq 0.05$ was achieved with 14 and 16 mixer elements. The values of K_L factor were compared with the commercial K_L factor value to the helical static mixer. The differences between this K_L factor values represent 2% in the case of the Newtonian fluids. The influence of the rotation and direction of the static elements has also been studied considering the influence in the CoV. Depending on the direction of rotation, the CoV value varies from 0.283 to 0.156 in the Glycerol mixture and from 0.244 to 0.197 in the hydrocarbons mixture in $L/D = 21$ (6 mixer elements). The 3D model proposed considers a multi-component flow in laminar regime, using Computational Fluid Dynamics (CFD). The results obtained are consistent with the literature experimental. The use of the helical static mixer in the hydrocarbon mixture shown good results related to the CoV, obteneing 0.034 (≤ 0.05). The results permit to infer the use of this static mixer would be an alternative to mixing fluids in the dilution of heavy oil process.

Key-words: static mixer, Computational Fluid Dynamics (CFD), Newtonian fluids, no Newtonian fluids, heavy oil, heavy oil dilution.

Lista de Figuras

Figura 2. 1 – Misturador estático helicoidal <i>Kenics KM</i> (<i>Chemineer, Inc.</i>). Adaptado de MEIJER <i>et al.</i> , (2012).....	28
Figura 2. 2 – Representação esquemática da divisão de fluxo do misturador estático <i>Kenics KM</i> . Adaptado de GYENIS, (2007).	29
Figura 2. 3 – Variações do misturador estático <i>Kenics KM</i> . 2a. <i>Kenics KMS</i> , 2b. <i>Kenics KMA</i> , 2c. <i>Kenics KMR</i> , 2d. <i>Kenics KME</i> . Adaptado de CHEMINEER, (2015).....	29
Figura 2. 4 – Misturador estático <i>SMV</i> (<i>Sulzer Inc.</i>). Adaptado de CORONEO, <i>et al.</i> , (2012)	30
Figura 2. 5 – Misturador estático <i>SMX</i> (<i>Sulzer Inc.</i>). Adaptado de MEIJER <i>et al.</i> , (2012)	30
Figura 2. 6 – Misturador estático <i>SMX plus</i> (<i>Sulzer Inc.</i>). Adaptado de SULZER, (2006).	31
Figura 2. 7 – Misturador estático <i>SMXL</i> (<i>Sulzer Inc.</i>). Adaptado de SULZER, (2006).	31
Figura 2. 8 – Misturador estático <i>LPD</i> (<i>Ross Engineering, Inc.</i>). Adaptado de MEIJER <i>et al.</i> , (2012).	32
Figura 2. 9 – Misturador estático <i>LLPD</i> (<i>Ross Engineering, Inc.</i>). Adaptado de SARDIK MIXERS, (2010).	32
Figura 2. 10 – Coeficiente de variação relativo em função Número de Reynolds e números de elementos para um misturador estático <i>Kenis KM</i> . Adaptado de MYERS K.J. <i>et al.</i> , (1997).	38
Figura 2. 11 – Visualização de fluxo para $Re = 43$ e $L/D = 1$. Adaptado de JAFFER & WOOD, (1998).	39
Figura 2. 12 – Visualização de fluxo para $Re = 97$ e $L/D = 1$. Adaptado de JAFFER & WOOD, (1998).	40
Figura 2. 13 –VCF como função do fluxo de permeação para o processo de ultra filtração com e sem misturador estático. Adaptado de KRSTIC <i>et al.</i> , (2007).	40

Figura 2. 14 – VCF como função da energia consumida para o processo de ultra filtração com e sem misturador estático. Adaptado de KRSTIC <i>et al.</i> , (2007).	41
Figura 2. 15 – Imagens PLIF resultado da mistura nos três experimentos. Adaptado de ALBERINI F. <i>et.al.</i> , (2013).	42
Figura 2. 16 – Padrão de estriação na saída do misturador estático helicoidal tipo <i>Kenics KM</i> . Adaptado de RAMSAY <i>et al.</i> , (2016).	43
Figura 2. 17 – Geometria do misturador estático tipo DS A-I. Adaptado de JOAQUIM Jr. <i>et al.</i> , (2011).	45
Figura 2. 18 – Geometria do misturador estático tipo Fins 35°. Adaptado de JOAQUIM Jr. <i>et al.</i> , (2011)	45
Figura 2. 19 – Intensidade de segregação depois de três elementos de mistura. Adaptado de RAULINE <i>et al.</i> , (1998).	46
Figura 2. 20 – Queda de pressão dos equipamentos. Adaptado de RAULINE <i>et al.</i> , (1998).	47
Figura 2. 21 – Comportamento do CoV para diferentes condições de operação (D50_A: $ReS/ReM = 9,6$; D50_B: $ReS/ReM = 12$; D50_C: $ReS/ReM = 12$; D50_D: $ReS/ReM = 3$). Adaptado de MONTANTE <i>et al.</i> , (2016).	49
Figura 2. 22 – Fração volumétrica do fluxo secundário num perfil longitudinal da tubulação. Adaptado de MONTANTE <i>et al.</i> , (2016).	50
Figura 2. 23 – Curvas de fluxo para fluidos newtonianos e não newtonianos. Adaptado de CHHABRA & RICHARDSON, (2008).	51
Figura 2. 24 – Contornos da geração de entropia para diferentes rotações N do impelidor. Adaptado de KHAPRE & MUNSHI, (2015).	52
Figura 2. 25 – Tomografia da mistura de três concentrações da solução de goma xantano com a corrente secundária newtoniana (solução salina). Adaptado de JEGATHEESWARAN <i>et al.</i> , (2017).	53
Figura 2. 26 – Tomografia da mistura de duas concentrações da solução de goma xantano com a corrente secundária não newtoniana. Adaptado de JEGATHEESWARAN <i>et al.</i> , (2017).	53
Figura 2. 27 – Efeito da diluição com condensados na viscosidade do óleo pesado com diferentes gravidades API. Adaptado de CHARLOS J.C., et al., (1988).	55
Figura 2. 28 – Comparação entre as viscosidades obtidas no reômetro e na tubulação Adaptado de Zhang J. et al., (2017).	57

Figura 2. 29 – Efeito do querosene na viscosidade do óleo pesado (a 50°C). Adaptado de (ZHU L., et al., (2018)).	58
Figura 2. 30 – Efeito da temperatura no óleo diluído. Adaptado de (ZHU L., et al., (2018)).	59
Figura 2. 31 – Volume elementar para balanços de conservação. Adaptado de MALISKA, (1995).	61
Figura 3. 1 – Metodologia Computacional	64
Figura 3. 2 – Esquema do sistema e domínio escolhido. Adaptado de ALBERINI F. <i>et al.</i> ,(2013).	65
Figura 3. 3 – Configuração geométrica.	66
Figura 3. 4 – Malha do misturador estático helicoidal de 6 elementos de mistura. (a) Malha dos elementos de mistura. (b) Malha na parede da tubulação.	68
Figura 3. 5 – Entrada dos fluidos ao misturador estático	71
Figura 4. 1 – vetores para determinar a qualidade ortogonal de uma célula	78
Figura 4. 2 – CoV para 3, 6 e 12 elementos de mistura nos estudos de Caso N°1	79
Figura 4. 3 – CoV para $L/D = 11$, $L/D = 21$, $L/D = 42$ e $L/D = 49$ correspondentes a 3, 6, 12 e 14 elementos de mistura nos estudos de Caso N°1, N°2 e N°3.	81
Figura 4. 4 - Perfis transversais de concentração até $L/D = 49$ (14 elementos de mistura) nos estudos de Caso N°1, N°2 e N°3.	83
Figura 4. 5 – CoV até $L/D = 56$ (16 elementos de mistura) para os estudos de Caso N°1, N°2 e N°3.	84
Figura 4. 6 – Perfis transversais de concentração para o estudo de Caso N°3 até $L/D = 56$.	85
Figura 4. 7 – Queda de pressão para o misturador estático nos estudos de Caso N°1, N°2 e N°3 até $L/D = 49$.	87
Figura 4. 8 – Parâmetro $(CoV * \Delta P)$ para o misturador estático helicoidal com $L/D = 42$.	88
Figura 4. 9 – CoV para a mistura de óleo pesado com óleo leve ($L/D = 49$).	90
Figura 4. 10 – Perfis transversais de concentração para $L/D = 21$, $L/D = 42$ e $L/D = 47$ (Mistura de óleo pesado com óleo leve).	90
Figura 4. 11 – Perfil longitudinal de velocidade para $L/D = 21$.	92
Figura 4. 12 – Perfis transversais de velocidade para o estudo de caso N°1	93
Figura 4. 13 – Configuração geométrica com diferenças na rotação dos elementos estáticos para o estudo de Caso N°1 ($L/D = 21$). (a) Padrão esquerda-direita. (b) Padrão direita-esquerda, esquerda-direita.	94

Figura 4. 14 – Perfis de concentração para configurações geométricas com diferenças na rotação dos elementos estáticos para o estudo de Caso N°4. (a) Padrão esquerda-direita. (b)

Padrão direita-esquerda, esquerda-direita..... 95

Figura 4. 15 – Perfis de concentração para configurações geométricas com diferenças na rotação dos elementos estáticos para o estudo de Caso N°1. (a) Padrão esquerda-direita. (b)

Padrão direita-esquerda, esquerda-direita..... 95

Lista de Tabelas

Tabela 2. 1 – Aplicações industriais dos misturadores estáticos.....	27
Tabela 2. 2 – Tipos de misturadores e aplicações industriais.....	33
Tabela 2. 3 – Parâmetros de mistura em regime laminar e queda de pressão para alguns misturadores estáticos comerciais.	36
Tabela 3. 1– Dimensões do sistema estudado	67
Tabela 3. 2 – Propriedades físicas dos fluidos de trabalho.....	69
Tabela 3. 3 – Estudos de Caso.....	70
Tabela 3. 4 – Propriedades dos fluidos hidrocarbonetos utilizados na segunda etapa. ...	70
Tabela 4. 1 – Parâmetros de malha utilizados no misturador estático com 6 elementos de mistura Estudo de Caso N°1.	76
Tabela 4. 2– Parâmetros de malha utilizados no misturador estático com 12 elementos de mistura Estudo de Caso N°1.	76
Tabela 4. 3 – Parâmetros de malha utilizados no misturador estático com 6 elementos de mistura para o Estudo de Caso N°2.	76
Tabela 4. 4 – Parâmetros de malha utilizados no misturador estático com 12 elementos de mistura para o Estudo de Caso N°2.	77
Tabela 4. 5 – Comparação de dados experimentais e de simulação da queda de pressão e fator K_L	80
Tabela 4. 6 – Queda de pressão no misturador estático até $L/D = 49$	86
Tabela 4. 7 – Queda de pressão no misturador estático para $L/D = 56$ no estudo de Caso N°3	88
Tabela 4. 8 – Queda de pressão no misturador estático com $L/D = 47$ (Fluidos hidrocarbonetos).	91
Tabela 4. 9 – Pressão para as configurações geométricas com diferenças na rotação dos elementos estáticos para o estudo de Caso N°1. (a) Padrão esquerda-direita. (b) Padrão direita-esquerda, esquerda-direita.	96

Nomenclatura

Letras Gregas

ΔP	Queda de Pressão	[Pa]
μ	Viscosidade	[Pa·s]
ρ	Densidade	[Kg/m ³]
τ	Tensor de deformação	[Pa]
$(\dot{\gamma})$	Taxa de deformação	[s ⁻¹]

Letras Latinas

M	Fluxo Mássico	[Lb/h]
L	Comprimento do misturado estático	[m]
D	Diâmetro interno da tubulação	[m]
A	Área superficial	[m ²]
V	Velocidade do fluido	[m/s]
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
Q	Vazão de líquido	[L/h]

Adimensionais

Ne	Número de Newton
Re_D	Número de Reynolds relacionado ao diâmetro interno da tubulação
K_L	Parâmetro de desenho de misturadores estáticos (Z)
C	Fração mássica
\bar{C}	Média aritmética da concentração
n	Número de amostras

C_v	Fração volumétrica não misturada
K_{iL}	Fator depende do tipo de misturador estático
L/D	Relação comprimento (L) e diâmetro (D)
X_A	Fração do componente A
\overline{X}_A	Fração média do componente A
I	Intensidade de segregação
M	Número de medições binárias
CoV	Coefficiente de variação
CoV_r	Coefficiente de variação relativo
CoV_0	Coefficiente de variação inicial
R_i	Número de Richardson
F	Força de Fricção
Σ	Variância
f	Fator de Fricção

Abreviações

CFD	Fluidodinâmica Computacional
PLIF	Fluorescência Induzida por Laser Planar
LIF	Fluorescência Induzida por Laser
MVF	Método dos Volumes Finitos
MDF	Método das Diferenças Finitas
MEF	Método dos Elementos Finitos
LPD	<i>Low Pressure Drop</i> (Misturador Estático)
LLPD	<i>Low Low Pressure Drop</i> (Misturador Estático)
SMX	Misturador Estático X
SMXL	Misturador Estático XL
SMF	Misturador Estático F
SMR	Misturador Estático R
SMV	Misturador Estático V
KM	Misturador <i>Kenics</i>
°API	Escala arbitrária que mede a densidade dos líquidos derivados do petróleo. (<i>American Petroleum Institute</i>).

Sumário

Capítulo 1	21
Introdução.....	21
1.1 Objetivos.....	23
1.1.1 Objetivo Principal	23
1.1.2 Objetivos Específicos.....	23
Capítulo 2	25
Revisão Bibliográfica	25
2.1 Misturadores Estáticos.....	25
2.1.1 Áreas de aplicação.....	26
2.1.2 Tipos de misturadores estáticos.....	27
2.1.3 Seleção de misturadores estáticos	34
2.2 Variáveis estudadas em misturadores estáticos	34
2.2.1 Queda de pressão.....	35
2.2.2 Eficiência de mistura.....	37
2.3 Trabalhos experimentais com misturadores estáticos	39
2.4 CFD em misturadores estáticos	44
2.5 Fluidos newtonianos e não newtonianos	50
2.5.1 Mistura de fluidos não newtonianos.....	51
2.6 Diluição de óleo pesado.....	54
2.7 Modelagem Matemática	59
2.7.1 Métodos Numéricos	59

2.7.2	Método dos volumes finitos baseados em elementos.....	60
2.7.3	Equações de Transporte	61
2.7.3.1	Equação de Continuidade	61
2.7.3.2	Equação de Momento	62
Capítulo 3	.....	64
Metodologia	.....	64
3.1	Identificação do problema	65
3.2	Pré-Processamento	66
3.2.1	Construção da Geometria	66
3.2.2	Geração de Malha.....	67
3.2.3	Modelos e Métodos	69
3.2.3.1	Propriedades físicas dos fluidos	69
3.2.3.2	Condições de Contorno	71
3.3	Solução	72
3.4	Pós-Processamento	73
3.4.1	Validação do Modelo	73
Capítulo 4	.....	74
Resultados	.....	74
4.1	Critérios de parada.....	74
4.3	Validação do modelo 3D	79
4.4	Mistura de Glicerol e mistura de Carbopol 940.	80
5.2	Campo de velocidade.....	91
5.3	Influência da Geometria	93
Capítulo 5	.....	97
Conclusões e Trabalhos futuros	.....	97
5.1	Conclusões.....	97
5.2	Trabalhos futuros.....	99

Bibliografia.....	101
-------------------	-----

Capítulo 1

Introdução

A agitação e mistura é uma operação complexa amplamente usada em processos industriais. A necessidade de obter uma qualidade ótima nos produtos desenvolvidos exige um melhoramento na eficiência de mistura. Portanto é necessária a implementação de equipamentos que permitam a otimização do processo de mistura.

Os misturadores estáticos são equipamentos projetados para a homogeneização e mistura de fluidos. Estes equipamentos são constituídos por elementos estáticos no interior de uma tubulação, os quais cumprem a função de dividir e redistribuir o escoamento na direção radial e tangencial à direção do fluido principal. Os misturadores estáticos são utilizados na indústria de alimentos, química, farmacêutica, petrolífera entre outras, visando a obtenção de um grau de homogeneização que garanta alta eficiência nas etapas posteriores ao processo de mistura.

Fluidos newtonianos com altas viscosidades como o Glicerol e o óleo pesado, e fluidos não newtonianos como o Carbopol 940 resultam em processos de mistura complexos. A mistura de óleo pesado com óleo leve é conhecida como o processo de diluição de óleo pesado. A mistura destes dois fluidos gera condições ótimas para o transporte do óleo através de oleoduto. A demanda deste tipo de recurso exige a otimização do transporte até os lugares de interesse, portanto é necessário garantir uma ótima homogeneização dos fluidos.

Uma alternativa viável para a mistura de óleo pesado e óleo leve é o uso de um misturador estático que permita um grau alto de homogeneização dos fluidos a baixo

custo. Existem vários tipos de misturadores estáticos utilizados em diversas aplicações. O misturador estático *Kenics KM* é um dos equipamentos mais utilizados na mistura de fluidos devido às características geométricas que apresenta. Os elementos estáticos de mistura do *Kenics KM* apresentam forma helicoidal, permitindo o movimento radial dos fluidos. O princípio de operação deste misturador estático considera um único padrão de divisão de fluxo e mistura radial simultaneamente.

Na área de agitação e mistura assim como em outras áreas relacionadas com a engenharia, a Fluidodinâmica Computacional (CFD) tem resultado em uma ferramenta importante. A conveniência do uso desta ferramenta está relacionada com a rapidez da obtenção de resultados e os aspectos econômicos que envolve um projeto. Além disso, CFD é utilizada para análise de situações nas quais a segurança do projeto experimental é baixa ou o fenômeno a ser representado exige condições difíceis de reproduzir no laboratório. Embora o uso de CFD tenha aumentado em diferentes processos industriais, não pretende substituir a fase experimental. O uso desta ferramenta visa a complementação da área experimental com o intuito de obter melhores resultados que permitam a viabilidade dos projetos.

O presente trabalho visa o estudo da mistura de fluidos newtonianos (Glicerol, óleo pesado e óleo leve) e não newtonianos (Carbopol 940) em um misturador estático helicoidal. As simulações foram realizadas utilizando CFD (software ANSYS CFX 17.0). O misturador estático a ser utilizado apresenta características similares ao *Kenics KM*. Para a avaliação do modelo de simulação proposto, serão considerados dados experimentais de Alberini F. *et al.*, (2013). A geometria do modelo de simulação foi construída a partir de informações proporcionadas por Alberini *et al.*, (2013) e algumas suposições consideradas, devido que não se tem a geometria real utilizada no experimento nem a geometria comercializada deste misturador estático.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Principal

Estudar o comportamento da mistura de uma solução aquosa de Glicerol 80% p/p, a mistura de óleo pesado e óleo leve, a mistura da solução aquosa de Carbopol 940 0,1% p/p, assim como a mistura da solução aquosa de Carbopol 940 0,1% p/p e Carbopol 940 0,2% p/p; em um misturador estático helicoidal, utilizando a Fluidodinâmica Computacional (CFD).

1.1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver um modelo computacional tridimensional utilizando CFD para um misturador estático helicoidal baseado nos dados experimentais encontrados em Alberini F. *et al.*, 2013.
- Validar o modelo computacional proposto a partir da comparação dos dados obtidos a partir da simulação com resultados experimentais encontrados em Alberini F. *et al.*, 2013.
- Estudar o grau de homogeneização, considerando o cálculo do coeficiente de variação CoV, para a mistura de Glicerol 80% p/p, a mistura de óleo pesado e óleo leve comumente utilizados no processo de diluição de óleo pesado, a mistura de Carbopol 940 0,1% p/p e a mistura de Carbopol 940 0,1% p/p e Carbopol 940 0,2% p/p.
- Determinar a energia necessária para o processo considerando a queda de pressão $[\Delta P]$ através do misturador estático. A queda de pressão será avaliada em relação ao fator K_L que relaciona a queda de pressão da tubulação sem misturador estático e a queda de pressão do misturador estático.

- Avaliar a influência do sentido de rotação dos elementos estáticos no grau de homogeneização da mistura, a partir do estudo do CoV.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

O capítulo de revisão bibliográfica apresenta os conceitos e definições básicas sobre misturadores estáticos. Este capítulo inclui as áreas de aplicação, os tipos de misturadores estáticos, os fluidos que podem ser misturados nestes dispositivos (dependo das características reológicas que apresentam), além da revisão das principais variáveis estudadas nestes equipamentos: queda de pressão e eficiência de mistura.

2.1 Misturadores Estáticos

A homogeneização e mistura são processos relevantes em indústrias como a indústria de alimentos, química, farmacêutica, mineira, de polímeros, tratamento de água, petrolífera entre outras. Esse tipo de processos são amplamente utilizados em sistemas de dispersão e emulsificação, transferência de calor, dissolução, e reações químicas, incluindo a mistura líquido-líquido, gás-líquido e sólido-líquido (COKER, 2007). Garantir uma adequada qualidade da mistura é de vital importância desde o ponto de vista do melhoramento e eficiência das etapas subsequentes em um processo, além das considerações econômicas que isso representa. Existem dois sistemas comumente utilizados no processo de mistura, que são o tanque agitado e o misturador estático. Devido ao baixo consumo de energia, baixo custo de manutenção, pouco espaço de instalação, a não existência de partes móveis e a alta eficiência de mistura, os misturadores estáticos resultam mais viáveis em determinados processos, comparados com os tanques agitados. (GHANEM *et al.*, 2014).

Os misturadores estáticos estão compostos por uma série de elementos estáticos no interior de uma tubulação circular ou retangular. Esses elementos estáticos são instalados com o intuito de dividir e redistribuir os fluidos na direção radial e tangencial à direção do fluxo principal e recombiná-los, repetindo o processo até conseguir um fluido uniforme e homogêneo na saída do equipamento (THAKUR *et al.*, 2003; COKER, 2007). Essa redistribuição de fluidos é função do desenho específico e do número de elementos estáticos necessários para obter uma mistura adequada. A geometria é o principal parâmetro ajustável para a otimização do equipamento dependendo do campo de aplicação. O estudo de configurações geométricas de misturadores estáticos tem sido desenvolvido por vários autores com o intuito de analisar a eficiência destas ferramentas (REGNER *et al.*, 2006; MONTANTE *et al.*, 2013).

2.1.1 Áreas de aplicação

Os misturadores estáticos são amplamente utilizados em diferentes campos industriais nos quais os processos de mistura, dispersão de gases, fluxo multifásico, troca de calor, diluição, etc. são fundamentais. O escoamento através dos misturadores estáticos, dependendo da natureza do fluido, pode ser laminar, transicional ou turbulento, proporcionando neste último a geração de vórtices em uma escala maior. No caso das dispersões, considerando que devem apresentar um tamanho de gota com diâmetro pequeno, o misturador estático consegue realizar o processo de forma eficiente. Este equipamento permite uma dissipação uniforme de energia através do equipamento e a distribuição simultânea dos componentes na seção transversal do tubo (THAKUR *et al.*, 2003). Dependendo da área de aplicação, a configuração dos elementos de mistura varia de forma e tamanho. No caso de reações químicas, estas configurações permitem que reações altamente exotérmicas e endotérmicas sejam realizadas em condições controladas e com precisão. A Tabela 2.1 sumariza as áreas nas quais são utilizados os misturadores estáticos com sua respectiva aplicação (SULZER, 2006).

Tabela 2. 1 – Aplicações industriais dos misturadores estáticos.

Indústria	Aplicação
Química	Reações Mistura de gases Dispersão líquido-líquido, orgânico-aquosa
Processamento de Cereais	Produção contínua e conversão de amido Mistura de comida para gado ovino
Processamento de Alimentos	Mistura de líquidos e emulsões Mistura de amidos Aquecimento e esfriamento de soluções
Processamento de Minerais	Recuperação de minerais por extração de solventes Diluição
Petroquímica e Refinamento	Mistura de reagentes gasosos Mistura de gasolina Mistura de petróleo
Farmacêutica e Cosmética	Mistura de medicamentos multicomponentes Dispersão de óleos Esterilização
Polímeros, Plásticos e Têxteis	Produção contínua de poliestireno Mistura de polímeros Preaquecimento de polímeros
Pinturas, Resinas e Adesivos	Diluição de sólidos Coloração e tinturas Aquecimento e dispersão de adesivos
Tratamento de Água	Adição de agentes coagulantes Desinfecção Controle de pH

Adaptado de THAKUR *et.al.*, (2003)

2.1.2 Tipos de misturadores estáticos

Existem diversos misturadores estáticos que são caracterizados dependendo da área na qual são utilizados e das propriedades físicas dos fluidos de trabalho. A seguir

são descritos os principais misturadores estáticos comerciais, as variações geométricas que apresentam e as principais características de funcionamento de cada equipamento.

Os elementos estáticos do misturador estático helicoidal *Kenics KM* (*Chemineer, Inc.*) (Figura 2.1) direcionam os fluidos de forma radial, promovendo o movimento desde as paredes da tubulação para o centro do misturador. Esse movimento dentro do misturador incrementa a eficiência de mistura do equipamento. No *Kenics KM*, os fluidos são completamente misturados, eliminando os gradientes radiais de temperatura, velocidade e composição. O regime de fluxo deste dispositivo pode ser laminar, permitindo que os elementos de mistura dividam e reorientem continuamente o fluxo produzindo mistura completa com mínima perda de carga. O *Kenics KM* pode ser utilizado em regime turbulento produzindo uma rápida mistura a partir do padrão circular que proporciona a geometria deste equipamento (CHEMINEER, 2015).

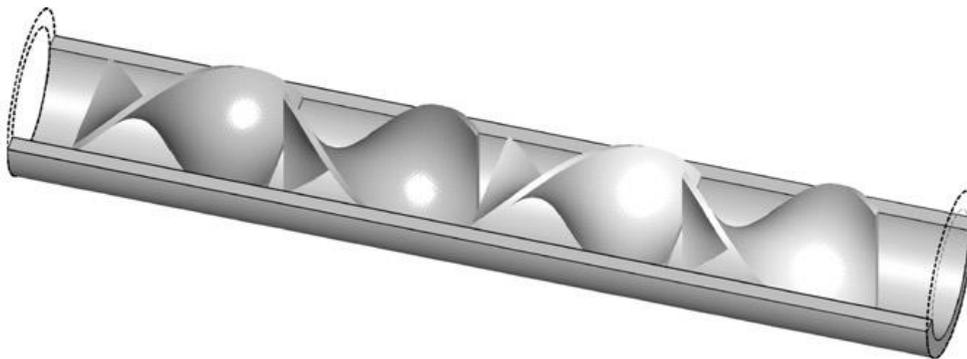


Figura 2. 1 – Misturador estático helicoidal *Kenics KM* (*Chemineer, Inc.*). Adaptado de MEIJER *et al.*, (2012).

Para fluxo em regime laminar, os fluidos são misturados da seguinte forma: o fluido que entra em contato com o extremo do elemento de mistura mais próximo se divide e continua o percurso pelos canais que aparecem a partir da forma helicoidal do elemento até o final do mesmo. Em cada elemento as correntes formadas se dividem novamente, resultando em um aumento exponencial da estratificação, conforme pode ser observado na Figura 2.2. A Figura 2.2 representa esquematicamente a divisão em diferentes correntes dos fluidos no misturador estático *Kenics KM* à medida que o fluido passa pelos elementos.

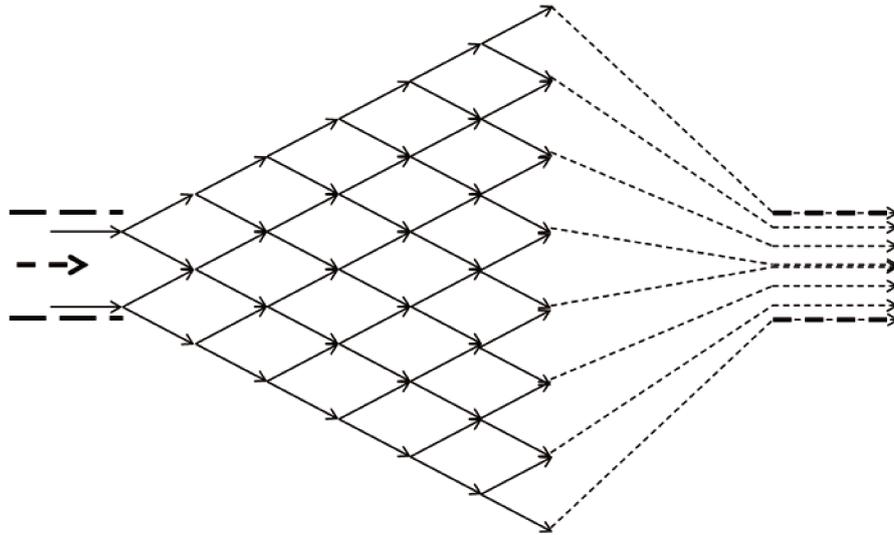


Figura 2. 2 – Representação esquemática da divisão de fluxo do misturador estático *Kenics KM*. Adaptado de GYENIS, (2007).

O *Kenics KM* apresenta quatro versões (Figura 2.3): o *Kenics KMS Fixed elements* (Figura 2.3a), o qual tem os elementos selados na parede do tubo; o *Kenics KMA Element Assembly* (Figura 2.3b) que é inserido na tubulação já existente do sistema no qual será utilizado; o *Kenics KMR Removal Element* (Figura 2.3c), que é facilmente removível da tubulação permitindo inspeções quando sejam requeridas; e o *Kenics KME Edge-Sealed Element* (Figura 2.3d) no qual as bordas dos elementos de mistura estão seladas na parede da tubulação com o intuito de eliminar as zonas mortas.



Figura 2. 3 – Variações do misturador estático *Kenics KM*. 2a. *Kenics KMS*, 2b. *Kenics KMA*, 2c. *Kenics KMR*, 2d. *Kenics KME*. Adaptado de CHEMINEER, (2015).

O misturador estático *SMV (Sulzer, Inc.)* (Figura 2.4) constitui-se de pratos corrugados e canais que dividem o fluxo em muitas subcorrentes, proporcionando uma

rápida mistura aos fluidos que escoam através dele. Este dispositivo é utilizado em regime transicional e turbulento para intensificar a transferência de massa, principalmente na dispersão de fluidos imiscíveis. O *SMV* é um equipamento com alta capacidade de adaptabilidade, pois permite que a entrada de energia seja otimizada para cumprir com os requerimentos específicos da área na qual será utilizado (SULZER, 2006).

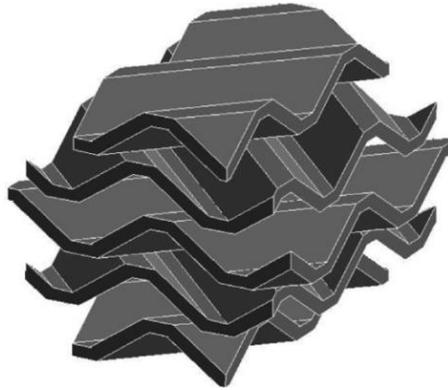


Figura 2. 4 – Misturador estático *SMV* (*Sulzer Inc.*). Adaptado de CORONEO, *et al.*, (2012)

Por mais de 30 anos, o misturador estático *SMX* (*Sulzer, Inc.*) (Figura 2.5) tem sido o misturador estático mais utilizado em escoamentos laminares. Este dispositivo é constituído por uma malha de barras inclinadas que dividem o fluido em camadas e o espalham na seção transversal do duto (SULZER, 2006).

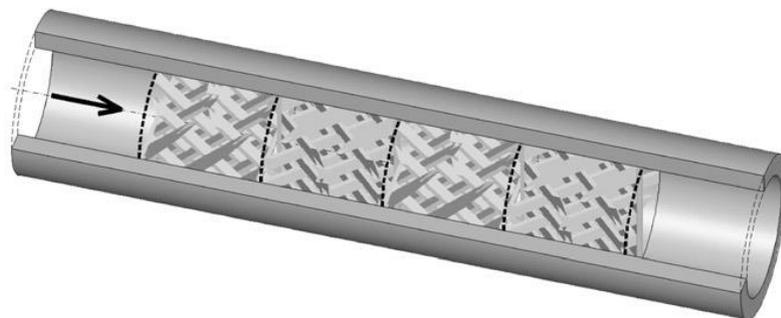


Figura 2. 5 – Misturador estático *SMX* (*Sulzer Inc.*). Adaptado de MEIJER *et al.*, (2012)

O misturador estático *SMX* apresenta algumas versões diferentes que têm sido desenvolvidas visando a otimização do equipamento. O *SMX plus* (Figura 2.6) utiliza o mesmo princípio de mistura do *SMX*, mostrando um aumento significativo na eficiência da energia requerida no processo. A queda de pressão gerada pelo *SMX plus* é menor comparada com o *SMX*, portanto é uma alternativa para fluidos com diferenças consideráveis na viscosidade (SULZER, 2006).



Figura 2. 6 – Misturador estático *SMX plus* (Sulzer Inc.). Adaptado de SULZER, (2006).

O misturador estático *SMXL* (Figura 2.7) é outra das variações do *SMX*. O *SMXL* é um desenho utilizado em misturas contínuas com um comprimento considerável e baixa queda de pressão. Normalmente é instalado no interior de trocadores de calor para melhorar os processos de transferência de calor (SULZER, 2006).



Figura 2. 7 – Misturador estático *SMXL* (Sulzer Inc.). Adaptado de SULZER, (2006).

O misturador estático *LPD* (*Low Pressure Drop*) (*Ross Engineering, Inc.*) (Figura 2.8) compõe-se de uma série de pratos semielípticos, onde um elemento é formado por dois pratos perpendiculares entre si. Normalmente, os elementos de mistura deste equipamento não se encontram selados na parede do tubo (ROSS, 2015).

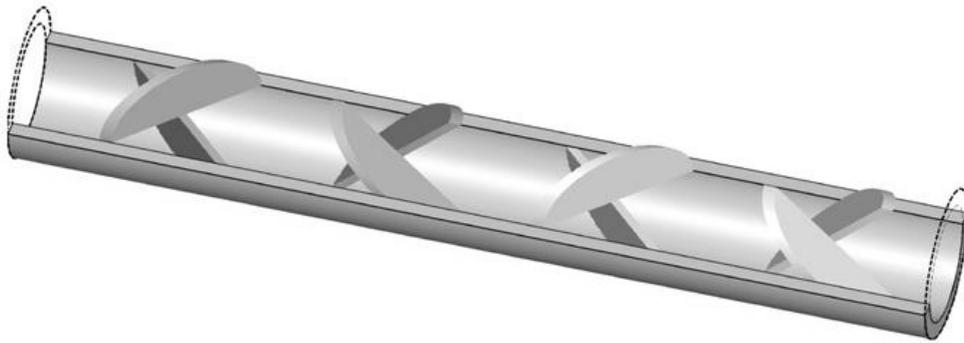


Figura 2. 8 – Misturador estático LPD (*Ross Engineering, Inc.*). Adaptado de MEIJER *et al.*, (2012).

Uma das variações do misturador estático *LPD* é o *LLPD* (*Low Low Pressure Drop*) (Figura 2.9), que consiste também de pratos semielípticos, com um ângulo de 120° entre si. A relação entre o comprimento e o diâmetro aumenta de 1,5 para 1,75 e a queda de pressão é reduzida num fator de 0,46 (ROSS, 2015).



Figura 2. 9 – Misturador estático LLPD (*Ross Engineering, Inc.*). Adaptado de SARDIK MIXERS, (2010).

A Tabela 2.2 sumariza alguns dos tipos de misturadores estáticos disponíveis, suas aplicações industriais e o regime de fluxo em que funciona o dispositivo. Na atualidade, os misturadores estáticos são usados em processos contínuos como uma alternativa aos tanques de agitação, conseguindo resultados adequados com custos menores, além de apresentar baixo consumo de energia. (THAKUR *et al.*, 2003).

Tabela 2. 2 – Tipos de misturadores e aplicações industriais.

Tipo de Misturados	Regime de Fluxo	Área de Aplicação
<i>Kenics</i>	Laminar/Turbulento	Homogeneização térmica de polímeros. Dispersão de gás.
	Turbulento ($980 < Re < 8500$)	Dispersão de líquidos viscosos.
<i>SMX</i>	Laminar	Mistura de líquidos altamente viscosos e líquidos com viscosidades extremadamente diferentes.
<i>SMV</i>	Turbulento	Mistura de líquidos com baixas viscosidades e transferência de massa em sistemas gás-líquido.
<i>SMXL</i>	Laminar	Homogeneização, dispersão e emulsificação.
	Laminar	Transferência de calor no melhoramento de fluidos viscosos.
<i>LPD/LLPD</i>	Laminar	Mistura de resinas.
	Turbulento	Mistura de óleos e gasolinas.

Adaptado de THAKUR *et al.*, (2003).

2.1.3 Seleção de misturadores estáticos

A seleção de um misturador estático viável economicamente, dependendo do processo no qual será utilizado, deve considerar a análise de alguns parâmetros relacionados com a viscosidade dos fluidos e com o tamanho do equipamento (COUPER *et al.*, 2012).

- *Viscosidade dos fluidos*: o cálculo do Número de Reynolds é realizado a partir da viscosidade da fase contínua, permitindo dessa forma estabelecer o regime de fluxo, com o qual será operado o equipamento.
- *Relação de viscosidades entre os fluidos*: as diferenças amplas de viscosidade entre os fluidos proporcionam uma maior dificuldade no processo de mistura, causando comportamento de imiscibilidade nos materiais. Outro dos problemas apresentados por essa diferença na viscosidade do fluido está relacionada com a canalização que pode apresentar o componente de baixa viscosidade na parede do misturador estático (ETCHELLS III & MEYER, 2004).
- *Tamanho do misturador estático*: para quedas de pressão (ΔP) altas o diâmetro do misturador estático pode aumentar visando a diminuição de ΔP . Em uma escala laboratorial torna-se difícil conseguir reproduzir estes dispositivos se os diâmetros do mesmo superam 1/8", o que ocasiona uma limitação de alguns misturadores estáticos.

2.2 Variáveis estudadas em misturadores estáticos

Com o intuito de escolher o misturador estático mais apropriado para o desenvolvimento de um processo específico são estudadas duas variáveis importantes: a eficiência de mistura e a queda de pressão. O desempenho destas variáveis depende do tipo de fluido circulando através da tubulação do misturador e como já foi mencionado, da geometria do equipamento.

2.2.1 Queda de pressão

A queda de pressão é um dos principais fatores que devem ser considerados no desenho e na escolha do tipo de misturador estático dependendo do processo no qual será utilizado. Este parâmetro está diretamente relacionado com a geometria dos elementos de mistura, com o número desses elementos por unidade de comprimento, e com as características de viscosidade e densidade do fluido. Para qualquer tipo de misturador estático escoando em regime laminar, a queda de pressão será dada pela Eq. (2.1) (COKER, 2007):

$$\Delta P_1 = 8,9 \times 10^{-8} (NeRe) \frac{\mu M \left(\frac{L}{D}\right)}{\rho(D)^3} \quad (2.1)$$

Em que Ne é o Número de Newton, o qual depende do equipamento desenhado, e seu valor se encontra numa faixa entre 0,8 e 1,9; M é a vazão mássica [lb/h]; μ é a viscosidade absoluta [Cp]; ρ é a densidade [lb/ft³]; L é comprimento do misturador estático [in]; D é o diâmetro interno da tubulação [in]; Re é o Número de Reynolds relacionado ao diâmetro interno da tubulação.

Para um fluido newtoniano (incompressível e isotérmico) num tubo circular, a queda de pressão é dada pela Eq. (2.2) (STREIFF *et al.*, 1999):

$$\Delta P = \frac{2f\rho V^2}{D} L \quad (2.2)$$

Em que L é o comprimento de um elemento de mistura, f é função do Número de Reynolds que é determinada experimentalmente ou por simulação e V é a velocidade do fluido. O valor de f nessa equação depende do regime de fluxo, seja laminar para o qual estaria representado por $f = \frac{Re}{16}$ ou turbulento tomando a forma de $f = 0,079Re^{-0.25}$.

A queda de pressão em misturadores estáticos considera uma aproximação denominada fator K_L . O fator K_L ou também conhecido como fator Z é um parâmetro de desenho que representa a relação entre as perdas de carga do tubo com misturador

estático e do tubo sem misturador estático (THAKUR *et al.*, 2003; COKER, 2007 e ETCHELLS III & MEYER, 2004), como é apresentado na Eq. (2.3).

$$K_L = \frac{f_{D_{ME}}}{f_{D_{tubo\ sem\ ME}}} = \frac{\Delta P_{ME}}{\Delta P_{tubo\ sem\ ME}} \quad (2.3)$$

$$\Delta P_{ME} = K_L \cdot \Delta P_{tubo\ vazio} \quad (2.4)$$

Sendo $f_{D_{ME}}$ o fator de fricção Darcy para o misturador estático e ΔP_{ME} a queda de pressão no misturador estático *Kenics KM*. A Tabela 2.3 apresenta os valores de K_L (coeficiente de queda de pressão em regime laminar) e K_{iL} (coeficiente de mistura em regime laminar) encontrados na literatura, os quais dependem do tipo de misturador estático.

Tabela 2. 3 – Parâmetros de mistura em regime laminar e queda de pressão para alguns misturadores estáticos comerciais.

Equipamento	K_L	K_{iL}
Tubo vazio	1	-
KM	6,9	0,87
SMX	37,5	0,63
SMXL	7,8	0,85
SMF	5,6	0,83
SMR	46,9	0,81

Adaptado de STREIFF *et al.*, (1999).

A adição de elementos de mistura incrementa a queda de pressão fazendo com que o requerimento de energia seja maior para possibilitar a mistura dos fluidos. O valor de ΔP está relacionado com a geometria dos elementos de mistura. Por exemplo, no caso de elementos de mistura entrelaçados ou empacotados, a queda de pressão por

unidade de comprimento é maior, devido a configuração, promovendo assim a formação de vórtices (THAKUR *et al.*, 2003).

A energia necessária para a mistura em um misturador estático se relaciona com a perda de carga gerada pelos elementos estáticos no interior da tubulação. Geralmente, todos os dispositivos de mistura têm consumo de energia no processo. Porém os misturadores estáticos são os únicos equipamentos de mistura que utilizam as forças gravitacionais como mecanismo de homogeneização (JOVANOVIĆ *et al.*, 2014).

2.2.2 Eficiência de mistura

Existem várias formas para determinar e quantificar a eficiência de mistura em um misturador estático (a partir da análise em uma seção transversal do sistema). Uma dessas formas é o estudo do coeficiente de variação (CoV), o qual considera o valor de 1 para uma mistura de baixa qualidade e 0 para uma mistura ideal. A intensidade de segregação está diretamente relacionada com o cálculo do CoV, sendo esta um momento estatístico de primeira ordem que quantifica a desvio da composição da mistura do caso ideal. O CoV é descrito a partir da variância (σ) de fração mássica (C), o número de amostras n e a média aritmética da concentração \bar{C} , como é representado nas Eq. (2.5) e (2.6). Quanto menor seja o valor da relação $\frac{\sigma}{\bar{C}}$, a homogeneização da mistura será maior (ETCHELLS III & MEYER, 2004; MYERS K.J. *et al.*, 1997; MEIJER *et al.*, 2012).

$$\sigma^2 = \frac{\sum(C - \bar{C})^2}{n - 1} \quad (2.5)$$

$$CoV = \frac{\sigma}{\bar{C}} \quad (2.6)$$

Além da definição do CoV, Couper *et al.*, (2012) utiliza o coeficiente de variação relativo (CoV_r) para quantificar o grau de homogeneização dos fluidos, o qual é dado pela Eq. (2.7).

$$CoV_r = \frac{CoV_{saida}}{CoV_{entrada}} = \frac{CoV}{CoV_0} \quad (2.7)$$

Em que o CoV é a variação da amostra misturada, medida em um plano na saída do misturador estático e o CoV_0 representa a variação da amostra não misturada, medida em um plano na entrada do equipamento.

A Figura 2.10 apresenta o CoV_r para o misturador estático *Kenics KM*, em função do Número de Reynolds. Como pode ser observado na Figura 2.10 para baixos valores de Reynolds é necessária uma quantidade maior de elementos de mistura com o intuito de obter uma qualidade de homogeneização alta. Por outro lado, para Números de Reynolds altos uma boa qualidade de mistura é atingida com poucos elementos de mistura (MYERS K.J. *et al.*, (1997)).

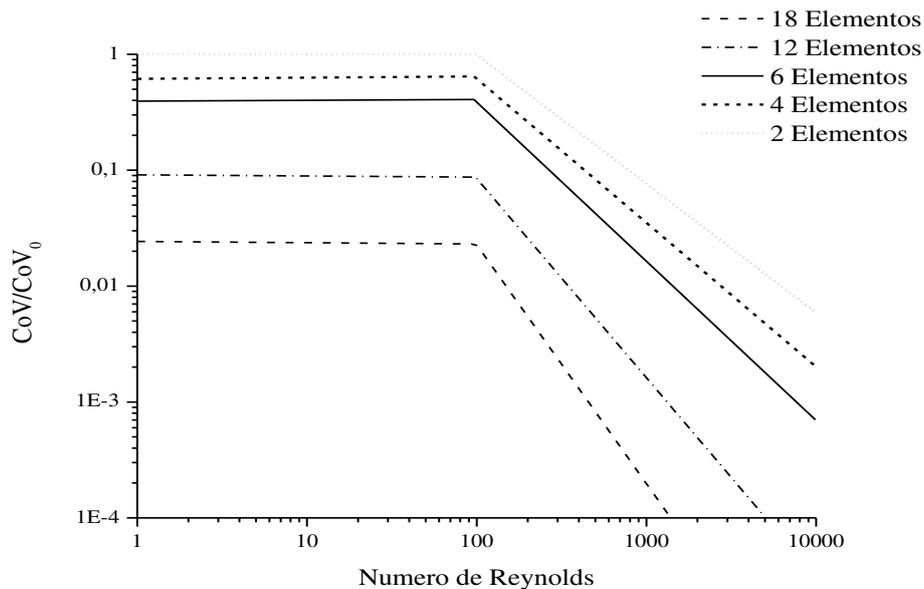


Figura 2. 10 – Coeficiente de variação relativo em função Número de Reynolds e números de elementos para um misturador estático *Kenis KM*. Adaptado de MYERS K.J. *et al.*, (1997).

O coeficiente de variação da amostra não misturada (CoV_0) tem sido estabelecido, a partir da teoria estatística, e depende da quantidade de material que precisa ser misturado, em função da fração volumétrica não misturada (C_v) como é apresentada na Eq. (2.8) (ETCHELLS III & MEYER, 2004).

$$CoV_0 = \left(\frac{1 - C_v}{C_v} \right)^{0,5} \quad (2.8)$$

O CoV_r é também definido a partir da relação com o comprimento e diâmetro do misturador estático como é apresentado na Eq (2.9) (ETCHELLS III & MEYER 2004):

$$CoV_r = \frac{CoV}{CoV_0} = K_{iL}^{L/D} \quad (2.9)$$

Em que K_{iL} depende do tipo de misturador estático; o L/D que representa a relação entre o comprimento L e o diâmetro D do equipamento. Os valores de K_{iL} estão disponíveis na Tabela 2.3.

2.3 Trabalhos experimentais com misturadores estáticos

Os estudos experimentais com misturadores estáticos têm sido desenvolvidos com ajuda de técnicas de diagnóstico ótico, com o intuito de visualizar o comportamento do fluido dentro do equipamento. A técnica de diagnóstico ótico LIF (*Laser Induced Fluorescence*) tem sido utilizada para estudar o comportamento dos fluidos no interior do misturador estático helicoidal tipo *Kenics* KM (JAFFER & WOOD, 1998). O misturador estático utilizado possui relações de comprimento (L) e diâmetro (D) (L/D) de 0,8, 1 e 1,5 com 90° de curvatura do elemento estático. Para cada configuração quantificou-se o grau de homogeneização na saída do equipamento, considerando a espessura e largura das estrias formadas. A Figura 2.11 mostra os vórtices formados, através do comprimento do misturador para um Número de Reynolds (Re) de 43 e $L/D = 1$. Para Re maiores, neste caso 97 a recirculação deve ser considerada, o que ocasiona a diminuição do número de estrias formadas como é apresentado na Figura 2.12.



Figura 2. 11 – Visualização de fluxo para $Re = 43$ e $L/D = 1$. Adaptado de JAFFER & WOOD, (1998).

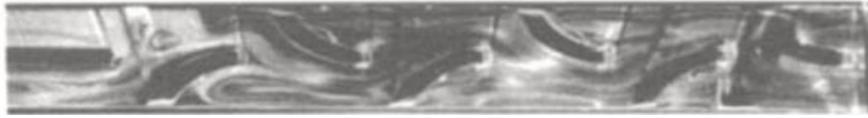


Figura 2. 12 – Visualização de fluxo para $Re = 97$ e $L/D = 1$. Adaptado de JAFFER & WOOD, (1998).

Outra das aplicações do misturador estático helicoidal tipo *Kenics KM* relaciona-se com o tratamento de águas residuais oleosas. Neste processo o misturador é utilizado como fonte de turbulência à ultra-filtração, com o intuito de diminuir a energia requerida no processo e aumento do fluxo de permeação, considerando que o requerimento de energia neste processo é afetado pela incrustação da membrana e a polarização da concentração. A Figura 2.13 apresenta os dados obtidos para o fluxo de permeação em função do fator de concentração volumétrico (VCF). É possível observar que utilizando o misturador estático, o fluxo de permeação aumenta consideravelmente em até 600% em relação à curva correspondente aos dados obtidos sem o misturador estático, garantindo desta forma a eficiência da ultra-filtração no tratamento de águas.

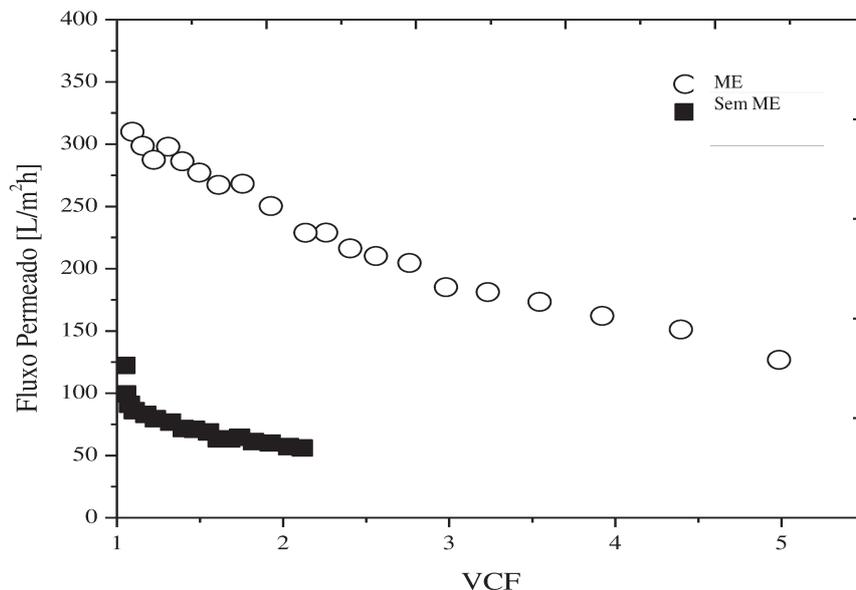


Figura 2. 13 –VCF como função do fluxo de permeação para o processo de ultra-filtração com e sem misturador estático. Adaptado de KRSTIC *et al.*, (2007).

A Figura 2.14 representa a energia consumida relacionada ao fator de concentração volumétrica, na qual é apresentada a energia consumida no processo. É possível notar que a energia requerida diminuiu em mais de 40% em relação aos dados obtidos sem o misturador estático (KRSTIC *et al.*, 2007).

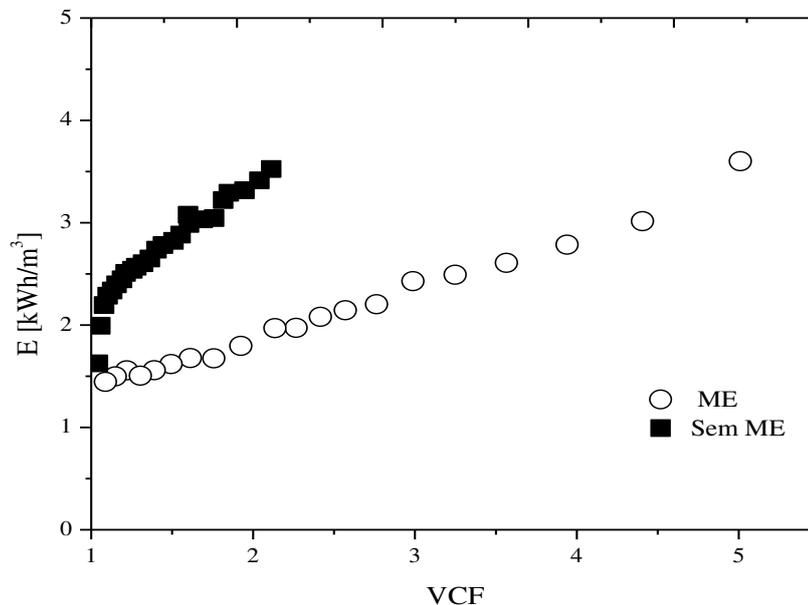


Figura 2. 14 – VCF como função da energia consumida para o processo de ultra filtração com e sem misturador estático. Adaptado de KRSTIC *et al.*, (2007).

O misturador estático SMV é amplamente utilizado em processos como a dispersão turbulenta líquido-líquido em alta concentração de fase dispersa. Estudos realizados com as dispersões líquido-líquido permitem determinar a influência de parâmetros físico-químicos no processo, avaliando-se o efeito da relação de tensões interfaciais, densidades e viscosidades em diâmetros de tamanho de gotícula médias. Com essas análises realizadas, demonstra-se que o principal parâmetro físico-químico que afeta o fenômeno de dispersão em misturadores estáticos é a natureza do surfactante (especialmente sua cinética de difusão), considerando a influência da concentração da fase dispersa sobre a queda de pressão e sobre a distribuição do tamanho das gotículas (LOBRY *et al.*, 2011).

Análises aprofundadas têm sido propostas visando estudar a eficiência de misturadores estáticos a partir de novas ferramentas que permitam verificar a exatidão das interpretações realizadas. Alberini F. *et al.*, (2013) sugeriu um novo método na

pesquisa relacionada com a eficiência destes equipamentos a partir do estudo de duas variáveis de forma conjunta, a intensidade de segregação e a escala de segregação, com o intuito de obter interpretações corretas. O método proposto considera a distribuição na seção transversal com uma intensidade de mistura dada. Essa análise relaciona a intensidade de segregação com o logaritmo da variância e a escala de segregação com a espessura das estrias, interpretada também como textura da mistura. A investigação foi desenvolvida utilizando dois fluidos, um fluido newtoniano e outro não newtoniano, no misturador estático helicoidal *Kenics KM*, como função de seis e doze elementos, utilizando a técnica *PLIF (Planar laser induced fluorescence)*. Segundo os resultados obtidos, é possível comprovar que um dos aspectos que deve ser considerado na seleção do misturador estático é a diferença das viscosidades dos fluidos de trabalho, pois essas diferenças amplas dificultam a mistura. Como é exibido na Figura 2.15, para o experimento 3 que apresenta valores diferentes nas viscosidades, no caso para seis elementos, a mistura experimenta um comportamento de imiscibilidade, sendo que neste caso os fluidos são completamente miscíveis. Caso contrário ocorre com a mistura dos experimentos 2 e 3, os quais apresentam maior grau de homogeneização devido que as viscosidades dos fluidos misturados são próximas.

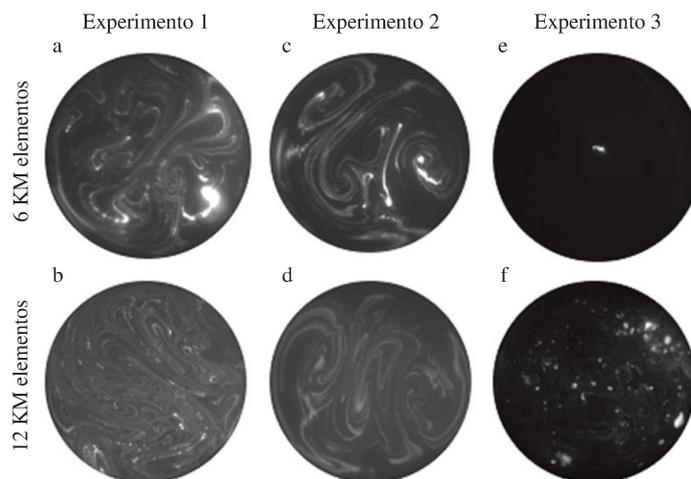


Figura 2. 15 – Imagens PLIF resultado da mistura nos três experimentos. Adaptado de ALBERINI F. *et.al.*, (2013).

A partir dos resultados obtidos demonstrou-se que o misturador estático com doze elementos é mais eficiente do que o de seis elementos, apresentando valores do CoV menores, os quais indicam maior eficiência do equipamento. Embora o CoV

confirmasse que a qualidade de mistura para 12 elementos é apropriada, a queda de pressão é alta, gerando um alto custo de energia para misturar os fluidos. A queda de pressão foi calculada considerando a tubulação vazia e com 12 elementos, empregando dados experimentais e teóricos para os fluidos utilizados no processo (ALBERINI F. *et al.*, 2013). Como foi observado nos resultados obtidos por Alberini F., *et al.* (2013), para os fluidos não newtonianos utilizados o coeficiente de variação não apresenta um padrão definido, por conseguinte se propõe analisar a segregação do fluido junto com o coeficiente de variação (CoV). Assim é possível demonstrar que a fração misturada diminui à medida que aumenta-se a elasticidade do fluido. Esta conclusão foi corroborada por Ramsay *et al.*, (2016) estudando a mistura do fluido viscoelástico Boger em um misturador estático helicoidal *Kenics KM*. O efeito da elasticidade e a velocidade superficial do fluido foram analisadas a partir das imagens obtidas com ajuda da técnica *PLIF (Planar laser induced fluorescence)*. A Figura 2.16 apresenta o padrão das estrias formadas na saída do misturador estático para a glicerina como fluido newtoniano e o Boger A e Boger B como fluidos não newtonianos. Na Figura 2.16 é possível observar que existe uma diferença significativa entre os perfis de mistura da glicerina e do Boger com uma velocidade superficial dada. Neste caso foi avaliada para velocidade $u = 0,15$ m/s, $u = 0,20$ m/s e $u = 0,30$ m/s.

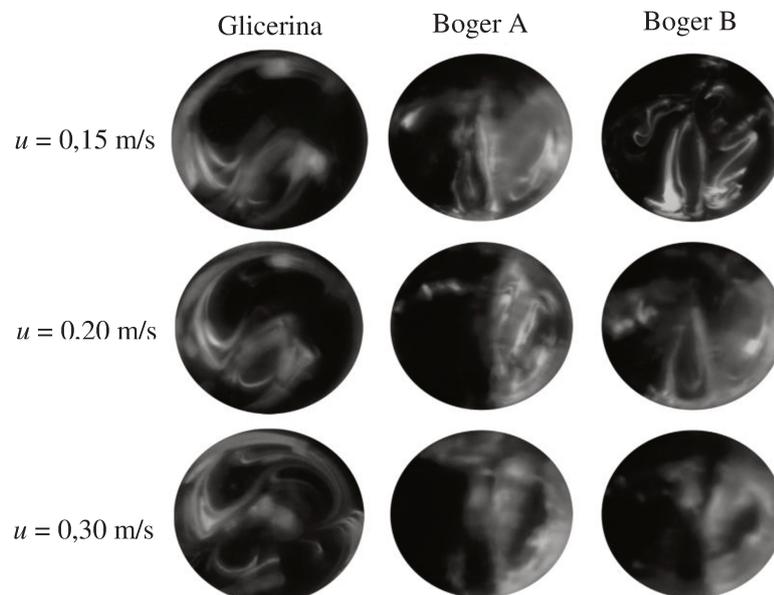


Figura 2. 16 – Padrão de estriação na saída do misturador estático helicoidal tipo *Kenics KM*. Adaptado de RAMSAY *et al.*, (2016).

Os resultados obtidos para a glicerina permitem verificar que o padrão laminar típico do misturador estático helicoidal tipo *Kenics* KM é mantido nas diferentes velocidades utilizadas. Para o caso dos fluidos Boger A e Boger B, os padrões de fluxo mostram um comportamento diferente, isto é, exibem desvios significativos quando a velocidade aumenta. Na Figura 2.16 é possível diferenciar o comportamento do traçador para o caso do fluido newtoniano e não newtoniano. Assim, nos perfis correspondentes aos fluidos Boger A e Boger B o traçador tem uma tendência a permanecer na parte esquerda do equipamento, apresentando níveis baixos de mistura. Para o caso da Glicerina o padrão das estrias formadas se mostra em toda a seção de saída, embora exiba regiões sem traçador, ou seja, com baixo nível de mistura. Este comportamento é devido aos fluidos viscoelásticos, os quais possuem diferenças na tensão normal, pois atuam perpendicularmente ao fluxo principal, formando um fluxo secundário. Em relação à qualidade da mistura é possível notar que o desenho é relativamente curto e está operando no extremo inferior das velocidades industriais, portanto, essa qualidade de mistura é baixa nos três casos.

2.4 CFD em misturadores estáticos

Os estudos desenvolvidos sobre misturadores estáticos utilizando CFD têm aumentado ao longo do tempo, considerando a ajuda das ferramentas computacionais na escolha e determinação da viabilidade de equipamentos, proporcionando soluções adequadas, e facilitando a representação do dispositivo em escalas laboratorial, piloto e industrial (ESSS 2016).

Novas geometrias têm sido propostas na área dos misturadores estáticos com o intuito de melhorar o rendimento destes equipamentos utilizando a Fluidodinâmica Computacional. A criação de geometrias tem sido realizada considerando características de desenho simples e os mecanismos de mistura, visando garantir que os elementos sólidos no interior do dispositivo proporcionem restrições ao escoamento, e desviem, redistribuam e misturem o fluido. Levando em consideração as diretrizes estabelecidas, desenvolveram-se dois novos dispositivos visando o aumento na eficiência de mistura e a baixa queda de pressão. O misturador estático DS A-I, apresentado na Figura 2.17, possui uma alta eficiência de mistura e queda de pressão aceitável. O misturador

estático Fins 35°, representado na Figura 2.18, mostra uma maior eficiência, é mais compacto que o DS A-I, mas a queda de pressão é mais alta (JOAQUIM Jr *et al.*, 2011).

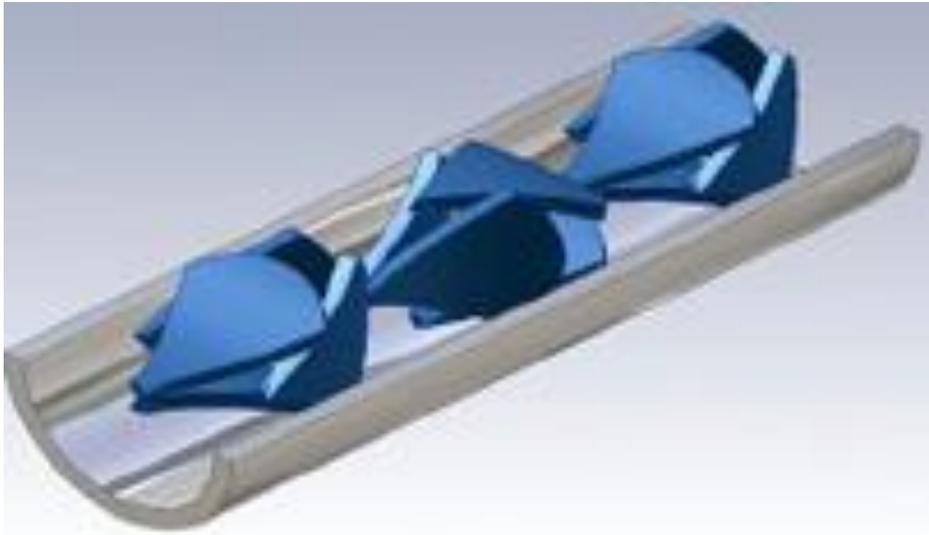


Figura 2. 17 – Geometria do misturador estático tipo DS A-I. Adaptado de JOAQUIM Jr. *et al.*, (2011).

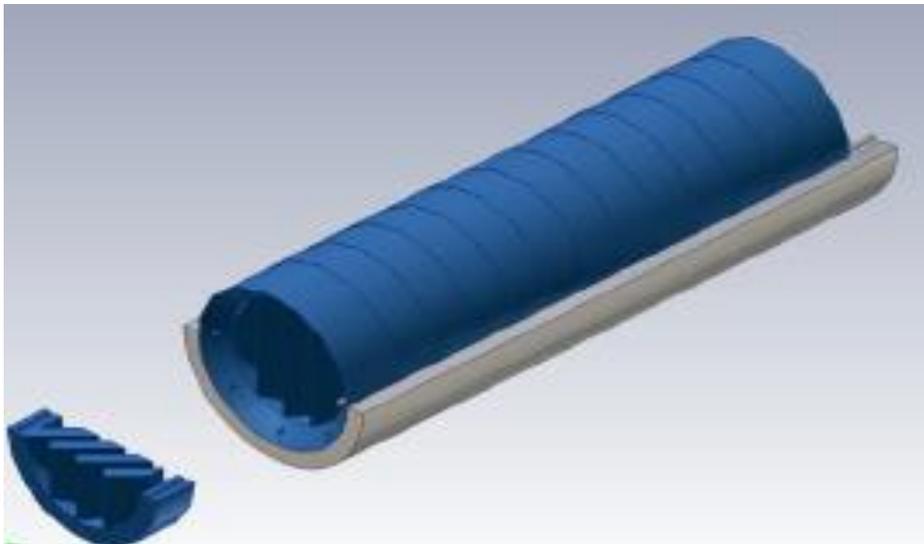


Figura 2. 18 – Geometria do misturador estático tipo Fins 35°. Adaptado de JOAQUIM Jr. *et al.*, (2011)

Modelos numéricos para os misturadores estáticos *Kenics*, *Inliner*, *LPD*, *Cleveland*, *ISG* e *SMX*, têm sido desenvolvidos com o intuito de analisar e comparar a perda por carga gerada nos elementos de mistura, a eficiência, alongamento das estrias, taxa de deformação e intensidade de segregação. Os misturadores estáticos *Kenics*,

Inliner, *LPD*, e *Cleveland* apresentam resultados similares nos parâmetros estudados. Os perfis transversais mostrados na Figura 2.19 são obtidos na saída do equipamento, com três elementos de mistura. Os perfis apresentam a intensidade de segregação s , para mais de 5000 traçadores injetados na entrada do misturador. Considerando os resultados expostos é possível observar que os misturadores estáticos *SMX* e *ISG* apresentam a homogeneização mais adequada, pois mostram valores de s de 0,13 e 0,18, respectivamente. O *ISG* mostra uma menor sensibilidade em relação à localização de injeção dos fluidos em comparação com os misturadores *Kenics*, *Inliner*, *LPD* e *Cleveland*. Entre esses últimos 4 modelos não existem diferenças significativas nos perfis de saída, pois considerando diferentes localizações de injeção dos fluidos, os traçadores não se dispersam, mas aparecem um pouco esticados (RAULINE *et al.*, 1998).

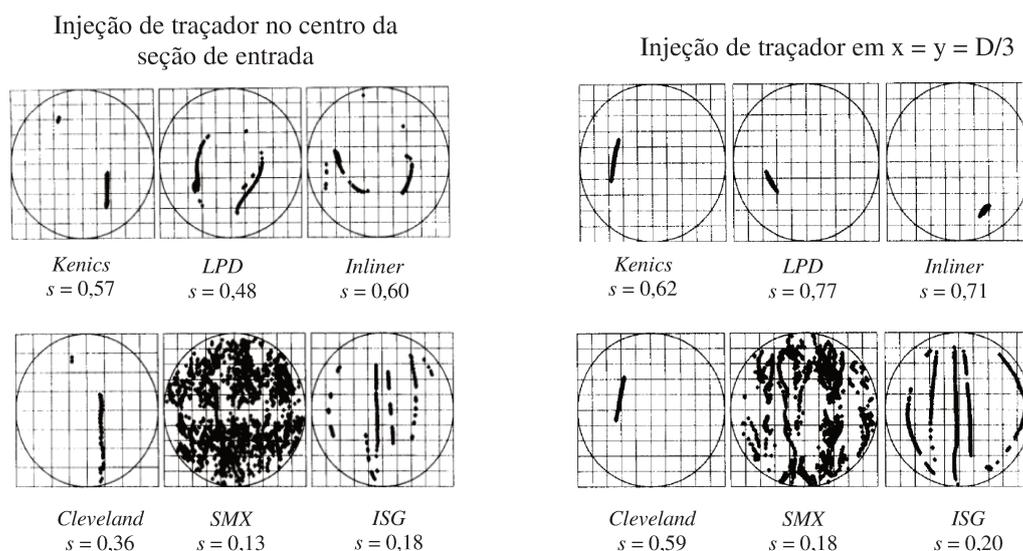


Figura 2. 19 – Intensidade de segregação depois de três elementos de mistura.

Adaptado de RAULINE *et al.*, (1998).

A Figura 2.20 exibe os resultados da perda de carga dos misturadores estáticos e compara os valores obtidos por meio da simulação, com os valores encontrados na literatura e os fornecidos pelo fabricante. Como pode ser observado, para cada equipamento os resultados obtidos são próximos aos esperados. Os modelos *Kenics*, *Inliner*, *LPD* e *Cleveland* apresentam quedas de pressão similares. Os modelos *SMX* e *ISG* embora apresentassem eficiência de mistura alta, exibem queda de pressão

consideravelmente alta. No caso do ISG apresenta uma perda por carga oito vezes maior da apresentada pelo SMX (RAULINE *et al.*, 1998).

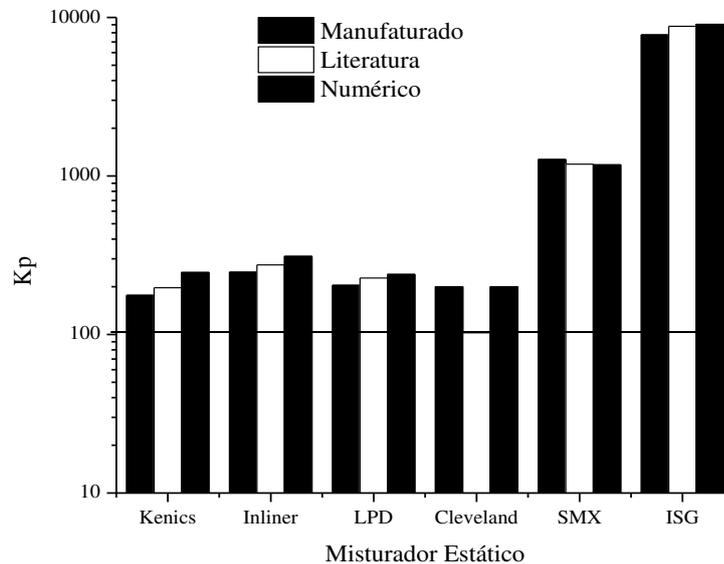


Figura 2. 20 – Queda de pressão dos equipamentos. Adaptado de RAULINE *et al.*, (1998).

Fourcade *et al.*, (2001); Galaktionov *et al.*, (2002); Jones *et al.*, (2002); Wageningen *et al.*, (2004) e Song & Han, (2005) são alguns dos autores que tem desenvolvido projetos relacionados ao *Kenics KM*. Tem-se analisado o comportamento dos fluidos dentro do misturador (estriação apresentada em regime de fluxo laminar ou turbulento), eficiência de mistura, intensidade de segregação e queda de pressão. A análise dessas variáveis é desenvolvida a partir de modelos numéricos, os quais foram comparados com resultados experimentais encontrando semelhança nos resultados.

O fator Z , a geometria helicoidal e a taxa de diminuição das estrias, relacionados com a formação de vórtices, têm sido analisados nos misturadores estáticos tipo *Kenics KM* e *Lightnin*. O *Kenics KM* apresenta uma torção suave nos elementos de mistura, e *Lightnin* apresenta uma configuração de pratos conectados de forma semi-elíptica por pratos triangulares formando bordas pelas quais os fluidos escoam. As bordas que apresenta a geometria do *Lightnin* são as responsáveis de padrões de fluxo diferentes entre as configurações. Essa diferença nos padrões de fluxo tem sido demonstrada com o aumento considerável na formação de vórtices no *Lightnin* o que ocasiona um

acréscimo na energia requerida de injeção dos fluidos a serem misturados, obtendo assim, um valor do fator Z maior do aceitado para este tipo de equipamentos. A taxa de diminuição das estrias também é influenciada pela formação de vórtices permitindo o incremento do seu alongamento. A diferença nos padrões de fluxo é gerada com o aumento da taxa de fluxo, como consequência, para baixas taxas de fluxo a eficiência do processo é alta e a queda de pressão é baixa (para ambas configurações). O misturador *Kenics KM* foi comparado com outras configurações geométricas, tais como: misturadores estáticos tipo *SMX*, *LPD* e *LLPD* as quais consideram diferentes estruturas de fluxo (REGNER *et al.*, 2006).

O consumo de energia em misturadores estáticos como *LPD*, *LLPD*, *SMX*, *Kenics KM*, em termos da queda de pressão, demonstra que o *Kenics KM* é o equipamento que apresenta menor queda de pressão para configurações com variações na curvatura dos elementos estáticos. Para uma configuração de 140° , o *Kenics KM* apresenta uma queda de pressão 20% mais baixa em relação com o ΔP para uma configuração com 180° , e em geral mostra-se ΔP menor se comparado com os demais tipos de misturadores estáticos (MEIJER *et al.*, 2012).

A diferença nas densidades dos fluidos leva a condições de homogeneização diferentes dependendo da dimensão do equipamento. Parâmetros como o Número de Reynolds, o Número de Richardson, a orientação dos elementos estáticos no interior da tubulação, a relação de viscosidades entre o fluido principal e o fluido secundário e a intensidade de segregação tem influência sobre o coeficiente de variação CoV. A intensidade de segregação é afetada significativamente pela relação das taxas de fluxo (relação entre o Número de Reynolds dos fluidos principal, Re_M e secundário, Re_S). A Figura 2.21 descreve o comportamento do CoV em função do comprimento do tubo. É possível observar que para relações de Re constantes, D50_B: $Re_S/Re_M = 12$ e D50_C: $Re_S/Re_M = 12$ o CoV apresenta valores menores que 0,05 (valor aceito na indústria, representado pela linha tracejada). Um importante desvio é mostrado na relação D50_D: $Re_S/Re_M = 3$, a qual mostra valores de CoV altos que indicam um baixo grau de homogeneização.

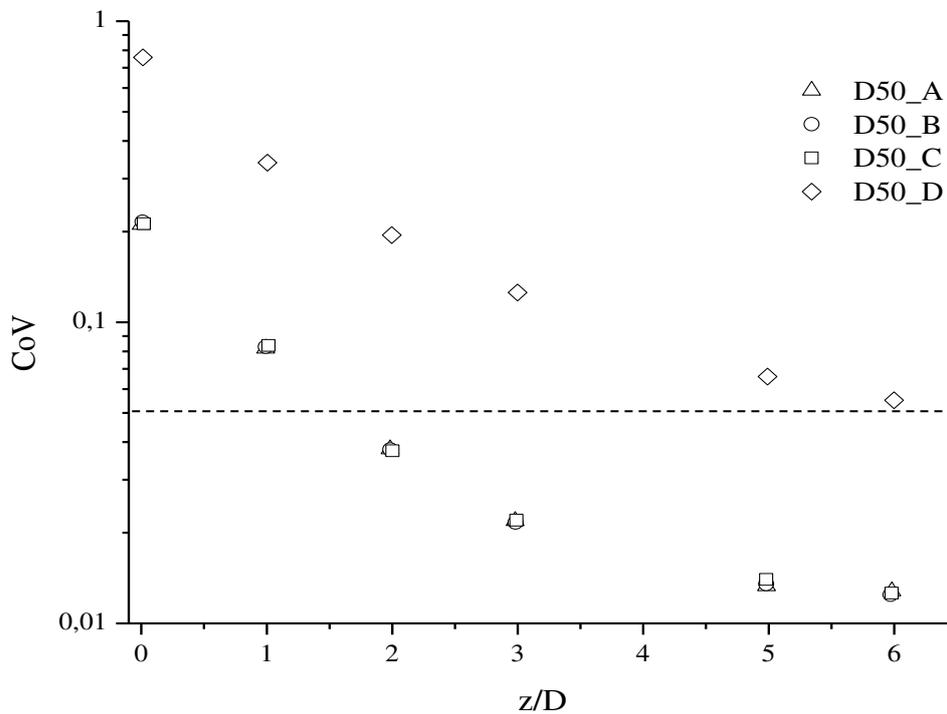


Figura 2. 21 – Comportamento do CoV para diferentes condições de operação (D50_A: $Re_S/Re_M = 9,6$; D50_B: $Re_S/Re_M = 12$; D50_C: $Re_S/Re_M = 12$; D50_D: $Re_S/Re_M = 3$. Adaptado de MONTANTE *et al.*, (2016).

A Figura 2.22 apresenta uma comparação dos perfis de homogeneização para a análise do CoV. Nesta Figura é possível observar o comportamento dos fluidos através do misturador estático utilizando planos longitudinais que correspondem aos dados exibidos na Figura 2.21. O CoV modifica-se significativamente quando o Número de Richardson está mais longe de zero, permitindo mudanças no campo de fluxo e nas velocidades. O comportamento da mistura, considerando a orientação desses elementos estáticos, depende da densidade dos fluidos. As variações de fluxo requeridas para atingir o regime de fluxo promovem efeitos de retro mistura. Este comportamento de mistura é dado considerando modelos numéricos propostos e realizados com ajuda do *software* FLUENT (MONTANTE *et al.*, 2016).

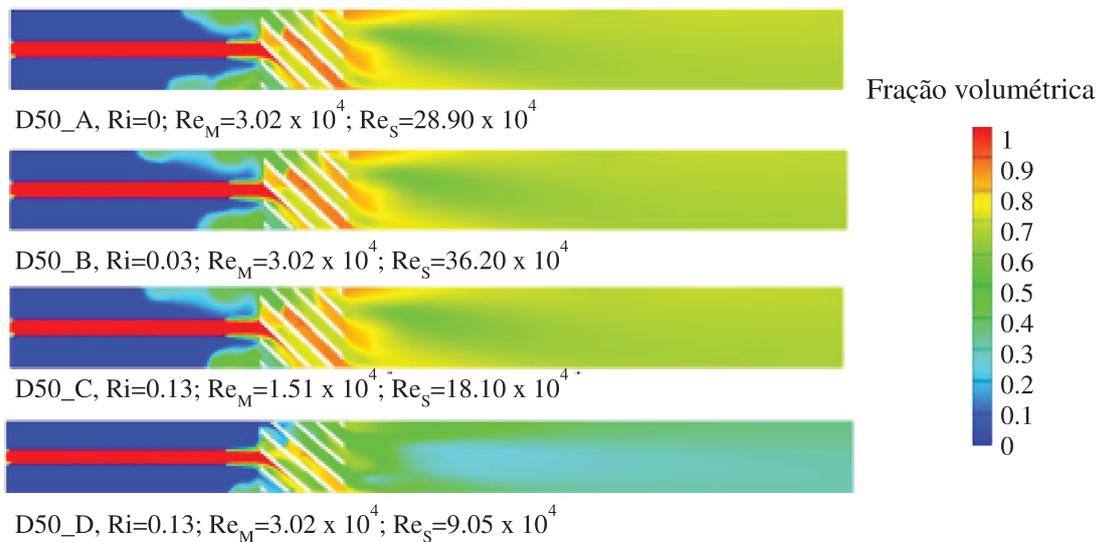


Figura 2. 22 – Fração volumétrica do fluxo secundário num perfil longitudinal da tubulação. Adaptado de MONTANTE *et al.*, (2016).

2.5 Fluidos newtonianos e não newtonianos

Considerando o comportamento reológico dos fluidos, estes podem ser classificados como newtonianos e não newtonianos. Os fluidos newtonianos apresentam proporcionalidade na razão de deformação em função da tensão de deformação, e obedecem à lei da viscosidade de Newton. Qualquer fluido que não segue a lei da viscosidade de Newton é chamado de fluido não newtoniano, o qual compreende fluidos com características reológicas diferentes, variando daqueles que mostram uma pequena variação em função do comportamento newtoniano e até daqueles que exibem comportamento quase elástico.

A maioria dos fluidos viscosos no mundo real são não newtonianos, e as leis e considerações utilizadas nos fluidos newtonianos devem ser modificadas para o tratamento deles. É importante modelar a reologia dos fluidos de forma correta, considerando que estes são manipulados nos processos industriais e podem mudar durante o processo. A Figura 2.23 apresenta o comportamento dos fluidos não newtonianos comparados com o comportamento de um fluido de tipo newtoniano (RANADE, 2002).

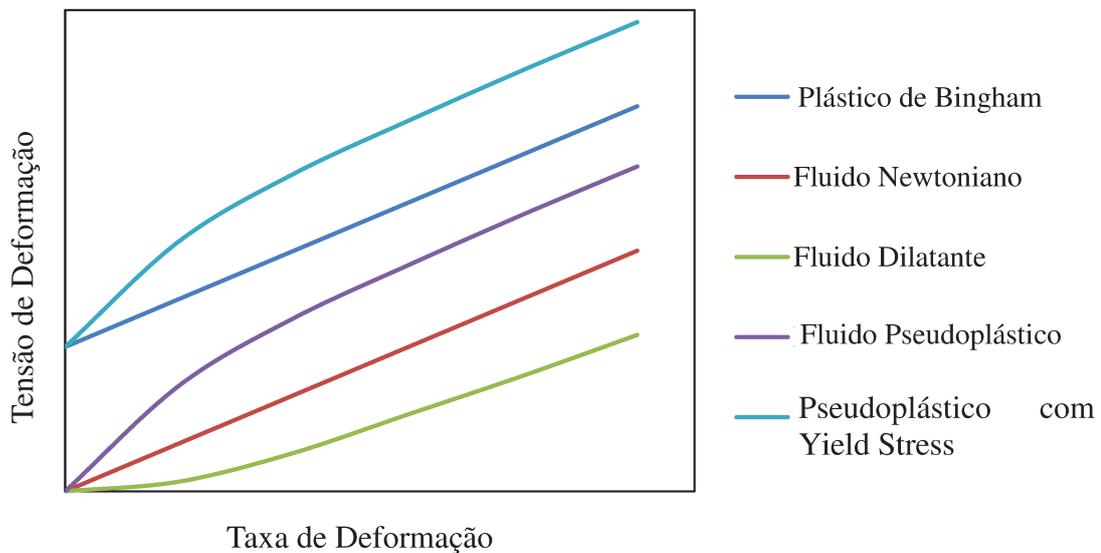


Figura 2. 23 – Curvas de fluxo para fluidos newtonianos e não newtonianos. Adaptado de CHHABRA & RICHARDSON, (2008).

2.5.1 Mistura de fluidos não newtonianos

Os fluidos não newtonianos possuem complexidade na reologia (apresentam altos gradientes de viscosidade) o que ocasiona baixo grau de homogeneização na mistura. Como consequência dessa complexidade, os fluidos não Newtonianos são investigados utilizando diversas técnicas com o intuito de entender seu comportamento. A mistura deste tipo de fluidos como o carboximetilcelulose (CMC) e a goma xantana (XG) têm sido analisados através de CFD utilizando tanques de mistura com impelidores tipo *Rushton* para estudar os campos de velocidade e o comportamento hidrodinâmico e termodinâmico em termos da geração de entropia. Nestes casos, os perfis de velocidade se aproximam da linha de ajuste da água na medida em que o Reynolds aumenta. A velocidade axial apresenta um comportamento adequado exceto nas proximidades do impelidor e da parede do reator, e a velocidade tangencial apresenta melhores resultados com o aumento da distância radial ao impelidor. A Figura 2.24 exibe a entropia para diferentes rotações do impelidor, demonstrando que esta aumenta com a irreversibilidade de fricção nas proximidades do impelidor, e com a velocidade e largura deste (KHAPRE & MUNSHI, 2015).

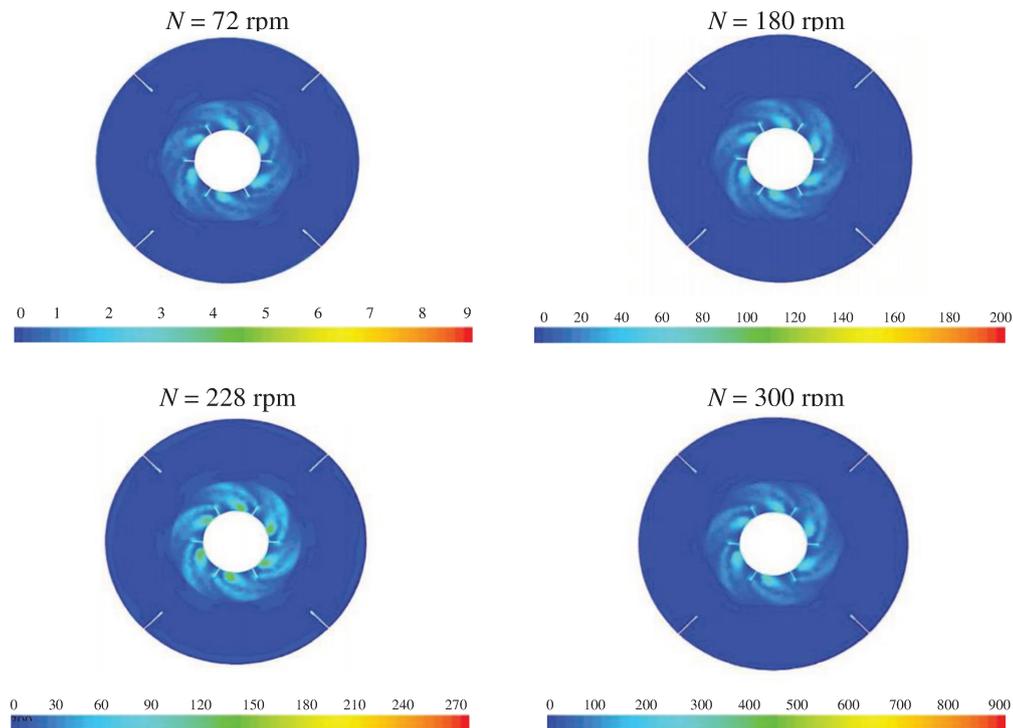


Figura 2. 24 – Contornos da geração de entropia para diferentes rotações N do impelidor.
Adaptado de KHAPRE & MUNSHI, (2015).

Os resultados obtidos por Khapre & Munshi (2015) foram reproduzidos e validados experimentalmente por Khapre & Munshi (2016) com o intuito de estabelecer dados da literatura que ajudem na previsão do desempenho de um impelidor tipo *Rushton* em um tanque agitado relacionado com a eficiência de mistura. Este tipo de pesquisa fornece informações sobre o tempo de mistura na zona de transição e fluxo turbulento. Considerando as vantagens que têm os misturadores estáticos sobre os tanques de mistura, alguns trabalhos são desenvolvidos utilizando misturadores estáticos. Estes trabalhos são realizados com o intuito de analisar as principais variáveis envolvidas na mistura de fluidos não newtonianos. O comportamento de fluidos como a solução de goma xantano, a qual é considerada como um fluido não newtoniano, pseudoplástico com *yield stress* e que obedece ao modelo reológico de Herschel-Bulkley foi analisado por Khapre & Munshi (2016) utilizando a tomografia de resistência elétrica (ERT) num misturador estático tipo SMX, visando analisar a eficiência de mistura da solução de goma xantano com uma corrente newtoniana e outra não newtoniana. A Figura 2.25 apresenta o comportamento para corrente secundária

newtoniana e a Figura 2.26 mostra a corrente secundaria para o fluido não newtoniano. Como a corrente secundária se trata de um fluido newtoniano, este favorece a mistura axial efetiva, o que não ocorre quando a corrente secundária é não newtoniana. Para as duas correntes secundárias a mistura apresenta comportamento radial mais eficaz quando a concentração da solução de goma xantana aumenta (JEGATHEESWARAN *et al.*, 2017).

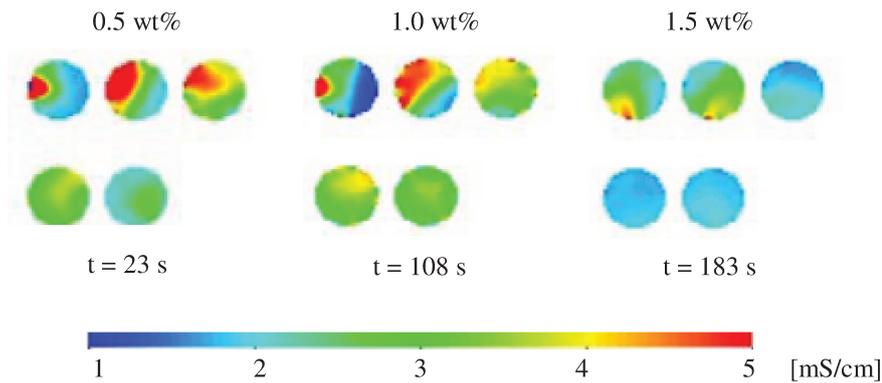


Figura 2. 25 – Tomografia da mistura de três concentrações da solução de goma xantano com a corrente secundária newtoniana (solução salina). Adaptado de JEGATHEESWARAN *et al.*, (2017).

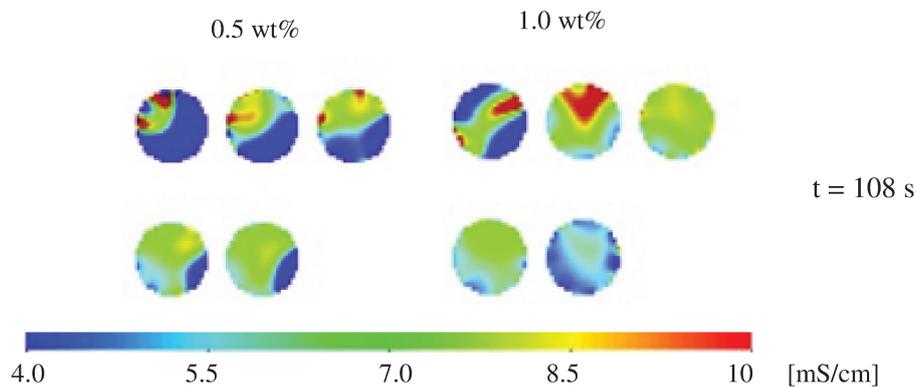


Figura 2. 26 – Tomografia da mistura de duas concentrações da solução de goma xantano com a corrente secundária não newtoniana. Adaptado de JEGATHEESWARAN *et al.*, (2017).

Como indicado anteriormente, nos anos recentes, as investigações encontradas na literatura demonstram a ampla utilidade dos misturadores estáticos em diversos

processos. Vantagens como a alta qualidade de homogeneização, a não presença de partes móveis e o baixo consumo de energia são algumas das características dos misturadores estáticos que os fazem atraentes em qualquer tipo de aplicação.

2.6 Diluição de óleo pesado

O óleo pesado e extrapesado são fluidos hidrocarbonetos altamente viscosos devido ao elevado conteúdo de componentes de alta massa molecular e o alto conteúdo de átomos na cadeia do hidrocarboneto (≥ 15). Este tipo de fluidos apresenta dificuldades para ser produzidos e transportados devido a suas condições reológicas.

A gravidade específica é medida baseada na definição dada pelo Instituto Americano do Petróleo em unidades de graus API ($^{\circ}$ API). Segundo este instituto, o petróleo pesado apresenta uma gravidade API igual ou menor a 20. A gravidade API é relacionada com a densidade relativa como é apresentado na Eq (2.10) (SANTOS R. G. et al., (2014)).

$$API = \frac{141,5}{d_r (60/60)} - 131,5 \quad (2.10)$$

Sendo d_r a densidade relativa em relação a água medida a 60°F.

Devido à complexidade, o petróleo é caracterizado a partir do fracionamento, baseado na polaridade e na solubilidade das amostras. A análise SARA é o método mais usado para descrever as frações do petróleo. Este método classifica o óleo cru em saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos. Estas análises demonstram que o conteúdo de asfaltenos e resinas presentes é maior no óleo pesado comparado com as frações desses componentes presente no óleo convencional. O alto conteúdo de asfaltenos e resinas fazem com que os processos de recuperação, transporte e refinamento se tornem complexos (SANTOS R. G. et al., (2014)).

O óleo pesado, o óleo extrapesado e o betumem representam uma quantidade considerável de reservas no mundo, cerca de 6 trilhões de barris. Portanto, grandes desafios são enfrentados com o intuito de produzir e transportar estes recursos aos locais de interesse. Existem vários processos realizados após a produção de óleo pesado com o

intuito de criar ótimas condições para o transporte deste tipo de hidrocarboneto através de um oleoduto. Emulsões de óleo em água (ZADYMOVA et al., (2017)), aquecimento das tubulações, diluição utilizando derivados do óleo e óleos leves são algumas das técnicas utilizadas para diminuir a viscosidade do óleo pesado. A técnica de diluição é comumente aplicada e envolve o uso de óleos leves e derivados do petróleo. As limitações do uso de diluentes no transporte de óleo pesado estão relacionadas com os custos e com a disponibilidade dos diluentes. Portanto é necessária uma ótima mistura entre o óleo pesado e o óleo leve que permita alta eficiência do processo com quantidades mínimas do produto (DAVUDOV D. & GHANBARNEZHAD M. R. (2017); SANIERE A. et al., (2004)).

A Figura 2.27 apresenta o efeito da diluição com condensados sobre a viscosidade do óleo pesado. Como pode ser observado na figura, o uso de diluentes como os condensados, a nafta, querosene e óleos leves proporcionam uma diminuição exponencial da viscosidade do óleo pesado. Portanto o método de diluição de óleo pesado é considerado um método de alta eficiência.

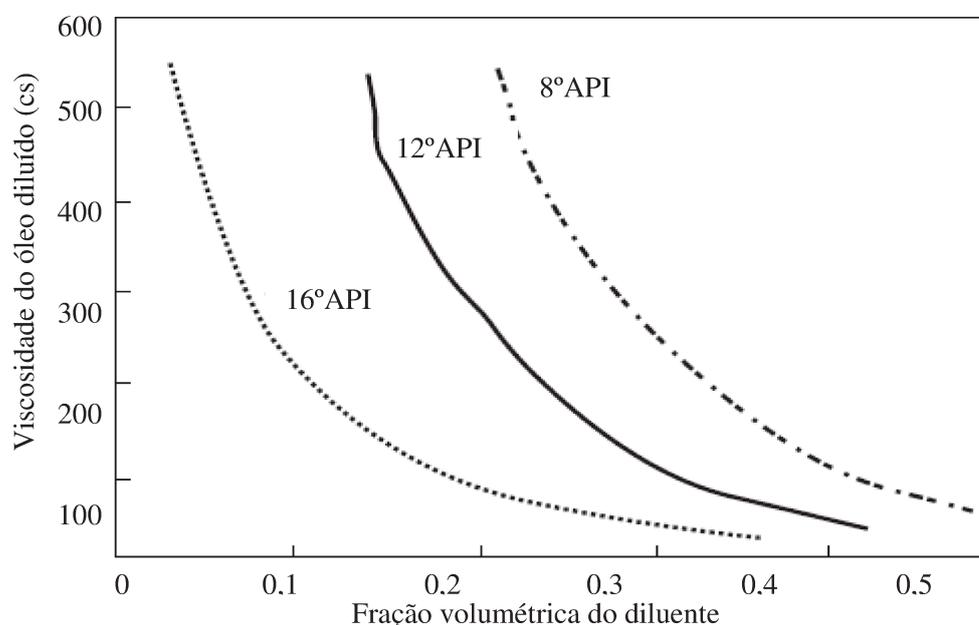


Figura 2. 27 – Efeito da diluição com condensados na viscosidade do óleo pesado com diferentes gravidades API. Adaptado de CHARLOS J.C., et al., (1988).

Frações volumétricas maiores a 30% v/v de diluente são necessárias para ampliar a capacidade de transporte do oleoduto. A dificuldade de aumentar esta fração volumétrica do diluente é a disponibilidade deste. Uma possibilidade de conseguir ter o diluente disponível seria a reciclagem dele. Porém seria necessário o investimento de instalação do sistema de reciclagem (SANIERE A. et al., (2004)).

Martínez -Palou Rafael, *et. al.*(2011) estudaram as formas de transportar o *heavy e extra - heavy oil* em oleodutos. Levando em consideração o incremento na produção deste tipo de petróleo na América do Norte, América do Sul e no oriente da Ásia é necessário o desenvolvimento de novas tecnologias que gerem soluções para o transporte do recurso. As condições deste tipo de hidrocarbonetos contemplam gravidade API menor que 20 e viscosidades da ordem de 10^3 cP com temperatura de 298.15 K. A indústria do petróleo enfrenta grandes desafios em relação ao transporte de hidrocarbonetos deste tipo, devido que a maioria dos oleodutos foram construídos para o transporte de óleos médios e leves. Um dos principais métodos utilizados é a diluição, a qual é amplamente usada quando os condensados ou óleos leves são de fácil aceso para o processo.

Shadi W. *et al.*, (2009) estudaram diferentes técnicas para reduzir a viscosidade dos óleos pesados, entre elas a mistura do petróleo pesado com óleo leve e álcool. Foram utilizados óleos com densidades de 995 Kg/m^3 e gravidade API de 10 para temperaturas de 15°C . O óleo pesado foi misturado em uma relação de 10% e 20% em volume de álcool. Os dados obtidos demonstraram que a diminuição da viscosidade foi de até 80% para temperatura de 25°C (de 10 para 2 Pa s) para 10% em volume de álcool. Para uma concentração de 20% em volume, a viscosidade diminuiu de 10 até 0,95 Pa s. No caso da adição do óleo leve, as proporções foram também 10% e 20% conseguindo redução de viscosidade, de 10 para 1,2 e 0,375 Pa s, respectivamente para temperaturas de 25°C . Os resultados obtidos permitiram concluir que a mistura do petróleo pesado com uma pequena quantidade de petróleo leve é o método mais apropriado e favorável para diminuir a viscosidade, em termos de eficiência.

Vários tipos de petróleo leve são misturados com o óleo pesado com o intuito de diminuir a viscosidade deste. Zhang J. et al., (2017), estudaram a diluição de óleo pesado a partir da mistura com diesel, considerando cinco concentrações diferentes. A

concentração volumétrica do diesel tem uma forte influência sobre a viscosidade do óleo pesado. O incremento na taxa de fluxo do diesel na mistura com o óleo pesado causa um aumento aproximadamente linear na queda de pressão através da tubulação. Não obstante, se a taxa de fluxo é mantida, a queda de pressão diminui com o aumento da concentração do diesel. Com o aumento na concentração do diesel a viscosidade diminui de forma exponencial. Este comportamento é mostrado na Figura 2.28, a qual apresenta os resultados da viscosidade determinados a partir do reômetro e do fluxo em uma tubulação, com diferentes taxas de fluxo da mistura. Como se observa nesta figura, com altas concentrações volumétricas do diesel, os dados obtidos no reômetro são consistentes com os dados do escoamento na tubulação. No entanto, com baixas taxas de fluxo os dados obtidos a partir do escoamento na tubulação são maiores que os dados do reômetro.

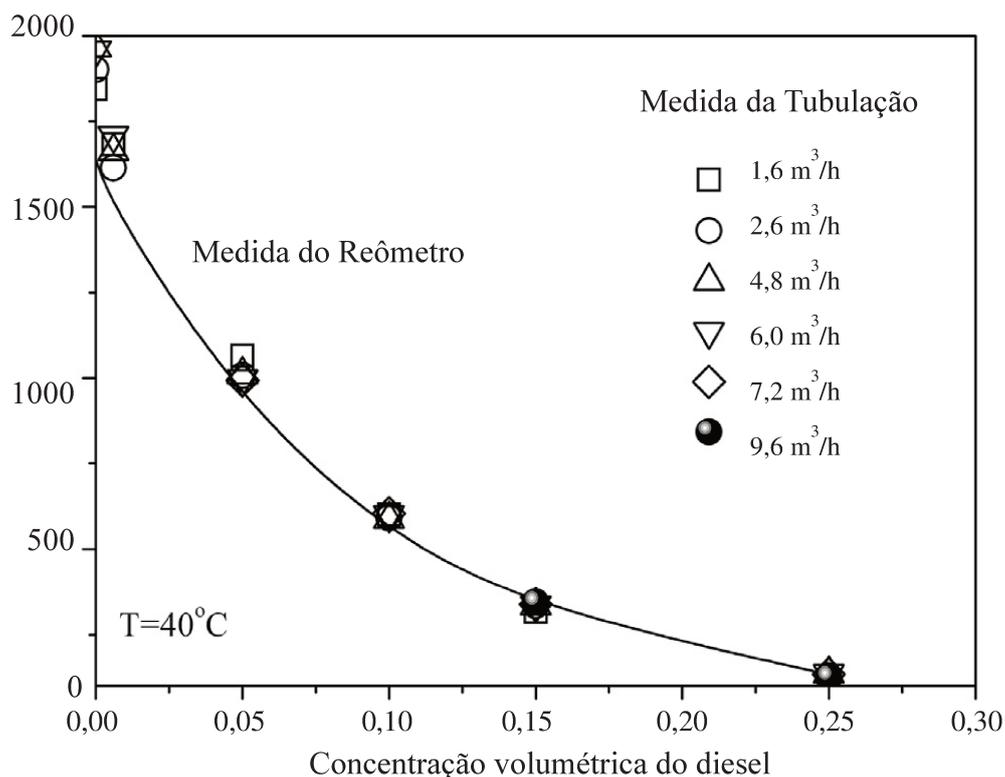


Figura 2. 28 – Comparação entre as viscosidades obtidas no reômetro e na tubulação

Adaptado de Zhang J. et al., (2017),.

Além disso, foi analisado o comportamento reológico da mistura de óleo pesado e diesel a partir da viscosidade aparente, comportamento tixotrópico, propriedades viscoelásticas e tensão de cedência. Os resultados dos testes reológicos demonstraram que com

o incremento na concentração volumétrica do diesel o modulo viscoso e o comportamento tixotrópico da mistura decrescem consideravelmente. Caso contrário ocorre com o modulo elástico o qual aumenta levemente (ZHANG J. et al., (2017)).

A diminuição da viscosidade do óleo pesado a partir dos métodos de diluição e aumento da temperatura foi estudada por Zhu L., et al., (2018). Foi analisado o efeito do querosene na viscosidade do óleo pesado. O óleo pesado foi misturado com querosene a 80°C por 4 horas. A proporção de querosene utilizada é de 9:1 (10 wt% de querosene na diluição). Posteriormente foi medida a viscosidade da diluição a 50°C encontrando os resultados da Figura 2.29. Como pode ser observado na Figura 2.29, após a adição de querosene a viscosidade diminui de forma exponencial e a taxa de redução da viscosidade aumenta continuamente. De outro lado, foi estudado o efeito da temperatura como é apresentado na Figura 2.30. Nesta figura é possível observar que a viscosidade diminui significativamente e a taxa de redução da viscosidade incrementa lentamente. Portanto a temperatura proporciona baixo efeito na taxa de redução do querosene.

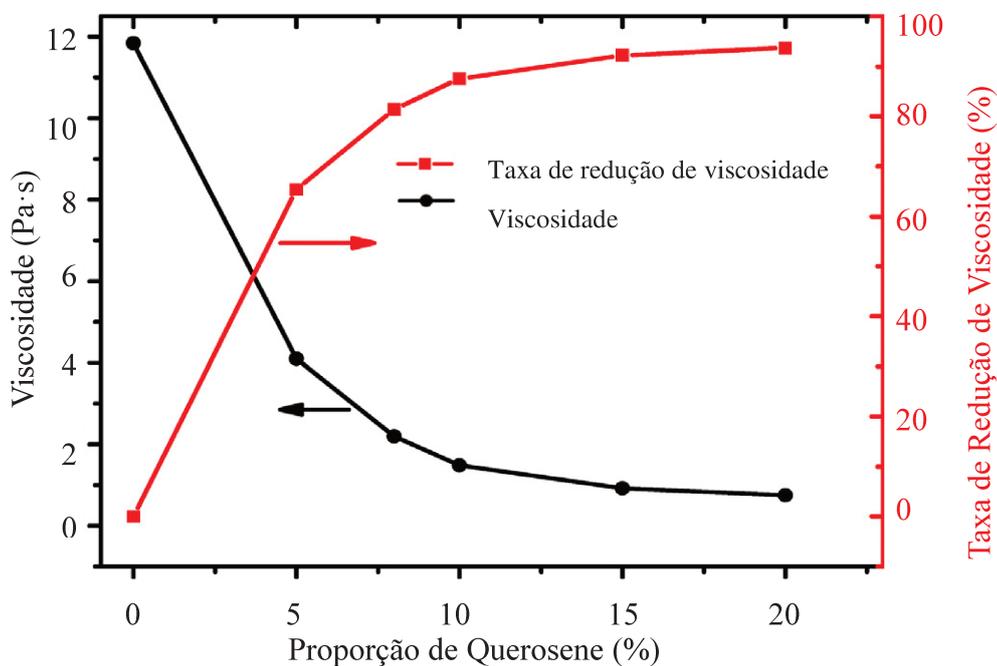


Figura 2. 29 – Efeito do querosene na viscosidade do óleo pesado (a 50°C). Adaptado de (ZHU L., et al., (2018)).

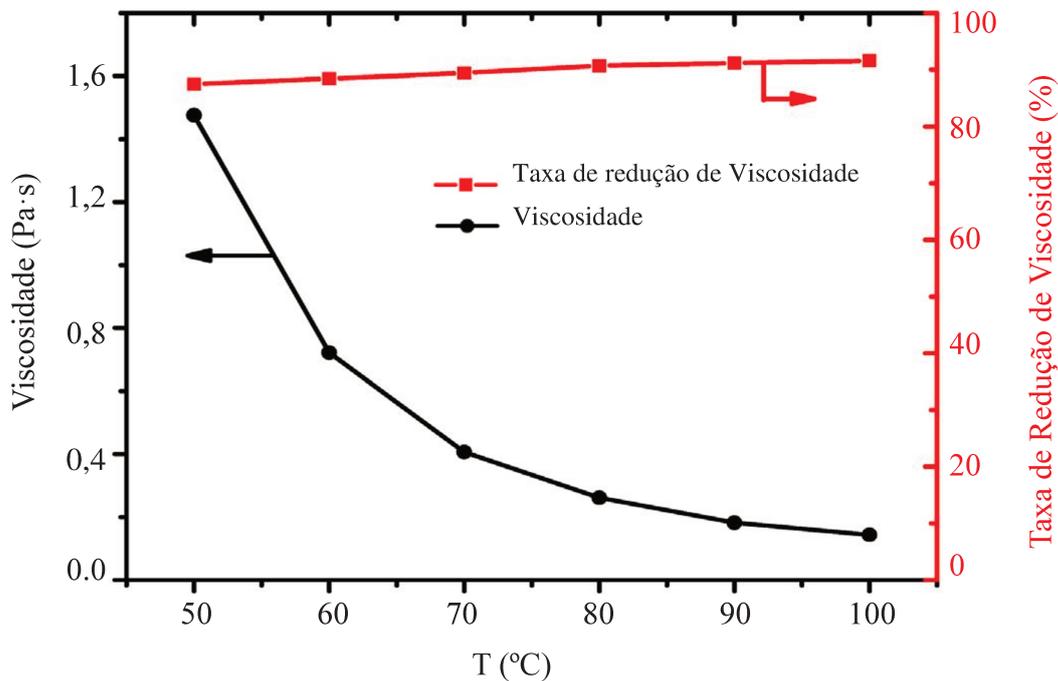


Figura 2. 30 – Efeito da temperatura no óleo diluído. Adaptado de (ZHU L., et al., (2018)).

2.7 Modelagem Matemática

Com o intuito de descrever o movimento dos fluidos em um sistema, a Fluidodinâmica Computacional (CFD) auxilia no desenvolvimento vários modelos numéricos e técnicas de solução. Eles são apresentados no presente capítulo, incluindo as equações de conservação de massa e momento para encontrar uma solução ao fenômeno físico estudado.

2.7.1 Métodos Numéricos

Para dar solução às equações diferenciais, entre elas as que governam o escoamento de fluidos existem vários métodos numéricos tradicionais como o Método das Diferenças Finitas (MDF), o Método dos Volumes Finitos (MVF) e o Método dos Elementos Finitos (MEF). Cada método cumpre com certas características que o convertem em um método específico dependendo do tipo de problema que pretende ser resolvido. Por exemplo, os problemas de escoamento, por utilizarem as equações de

conservação de momento ou também conhecidas como Equações de Navier-Stocks são altamente não lineares. Para este tipo de situações o MDF era o método mais utilizado, mas apresentava problemas para geometrias complexas. Caso contrário ocorre com os problemas de estruturas relacionados à elasticidade, os quais resultam ter características lineares porque não consideram termos advectivos e sim difusivos dentro das equações utilizadas e para as quais se busca uma solução a partir do MEF.

As ferramentas para solução de equações que estavam disponíveis até a década de 1970 eram o MDF, o qual tinha um amplo desenvolvimento nos problemas de fluidos, mas seu comportamento para geometrias complexas não era adequado; e o MEF o qual se ajustava às geometrias complexas, mas resultava inapropriado, devido que não relacionava a forma de tratar os termos advectivos das equações de movimento. Essa foi a principal motivação para o desenvolvimento de novas pesquisas sobre o Método dos Volumes Finitos, o qual obtém as equações a partir do balanço de conservação no volume elementar (MALISKA 1995).

2.7.2 Método dos volumes finitos baseados em elementos

O método dos volumes finitos baseados em elementos é amplamente utilizado em fluidodinâmica computacional na criação de malhas estruturadas e não estruturadas, devido à não restrição do volume de controle. O método dos volumes finitos consiste em dividir o domínio em volumes de controle ou subdomínios. Cada subdomínio representa uma célula da malha, onde são formuladas as equações de conservação. Cada subdomínio apresenta um ponto central (nodo) o qual guarda informação sobre as variáveis de interesse (concentração, velocidade, pressão, etc). O MVF considera a definição e representação geométrica de elemento do MEF, razão pela qual é denominado Método dos Volumes Finitos baseado em elementos (MVFbE).

O Método dos Volumes Finitos aproxima suas equações considerando o balanço no volume de controle gerado a partir dos elementos. As equações na forma conservativa são aproximadas, contemplando a integração no volume elementar em espaço e tempo. A Figura 2.31 representa o volume elementar tridimensional, o qual permite relacionar as equações aproximadas utilizadas no MVF com as equações diferenciais na forma conservativa (MALISKA, (1995)).

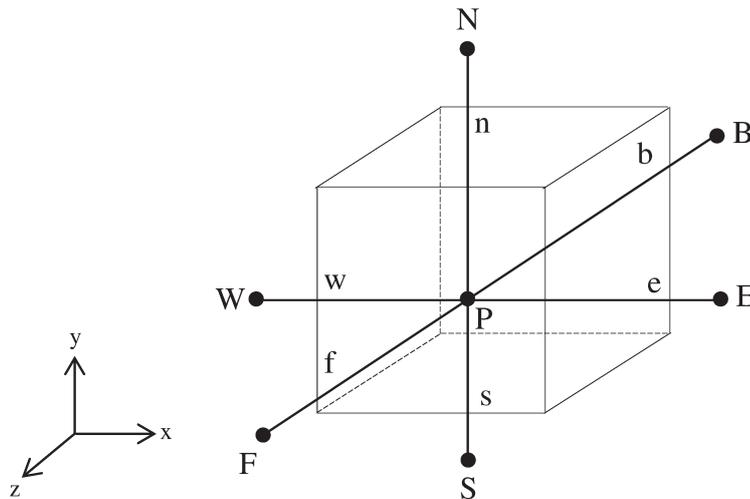


Figura 2. 31 – Volume elementar para balanços de conservação. Adaptado de MALISKA, (1995).

No volume elementar as letras *e*, *w*, *n*, *e* *s* representam os pontos cardiais leste, oeste, norte e sul, respectivamente; *e* *f* e *b* representam face frontal e face posterior, respectivamente, os quais são utilizados na discretização numérica com o intuito de nomear as faces do volume de controle.

2.7.3 Equações de Transporte

O movimento do fluido, especificamente nos processos de agitação e mistura, é um fenômeno físico modelado considerando as equações de conservação de massa e momento, as quais são apresentadas a seguir.

2.7.3.1 Equação de Continuidade

A Equação de Continuidade representa a taxa de incremento de massa por unidade de volume do fluido e está descrita, em coordenadas cartesianas, pela Eq. (2.11).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \left(\frac{\partial}{\partial x} \rho v_x + \frac{\partial}{\partial y} \rho v_y + \frac{\partial}{\partial z} \rho v_z \right) \quad (2.11)$$

A Eq. (2.11) expressa-se de forma concisa utilizando a notação vetorial mostrado na Eq. (2.12), para um fluido compressível.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\nabla \cdot \rho \mathbf{v}) \quad (2.12)$$

Sendo ρ a densidade e \mathbf{v} a velocidade. O termo da parte esquerda da Eq. (2.12) representa a taxa de densidade do fluido no tempo e o termo da parte direita descreve o fluxo líquido de massa que sai do elemento através dos limites e é conhecido como termo convectivo.

Para um fluido incompressível a densidade ρ é constante ($(\nabla \cdot \rho \mathbf{v}) = 0$), portanto a Eq. (2.12) converte-se na Eq. (2.13).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.13)$$

2.7.3.2 Equação de Momento

O balanço de momento pode ser determinado pela Eq. (2.14).

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho v_x = - \left(\frac{\partial}{\partial x} \phi_{xx} + \frac{\partial}{\partial y} \phi_{yx} + \frac{\partial}{\partial z} \phi_{zx} \right) + \rho g_x \quad (2.14)$$

A Equação de momento é uma equação vetor em cada um dos três componentes x , y e z . As equações de momento nas três direções são conhecidas como Equações de Navier-Stokes e consideram o transporte de momento por convecção e difusão. A Eq. (2.14) também pode ser representada em forma vetorial como é apresentado na Eq. (2.15).

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \mathbf{v} = -[\nabla \cdot \rho \mathbf{v} \mathbf{v}] - \nabla p - [\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}] + \rho \mathbf{g} \quad (2.15)$$

Em que p é a pressão do fluido, g representa a aceleração da gravidade e o tensor de tensão é simbolizado por τ . A divergência do tensor de tensão é a responsável da difusão do momento. O gradiente de pressão e a força gravitacional são consideradas como termos fontes.

Capítulo 3

Metodologia

A metodologia apresenta todos os procedimentos para o desenvolvimento das simulações em CFD e a descrição de cada etapa do processo. Utiliza-se uma metodologia baseada em quatro fases principais: (1) Identificação do problema, (2) Pré-processamento, (3) Solução numérica do modelo e (4) Pós-processamento. A Figura 3.1 resume os principais passos que devem ser levados em consideração na simulação CFD.

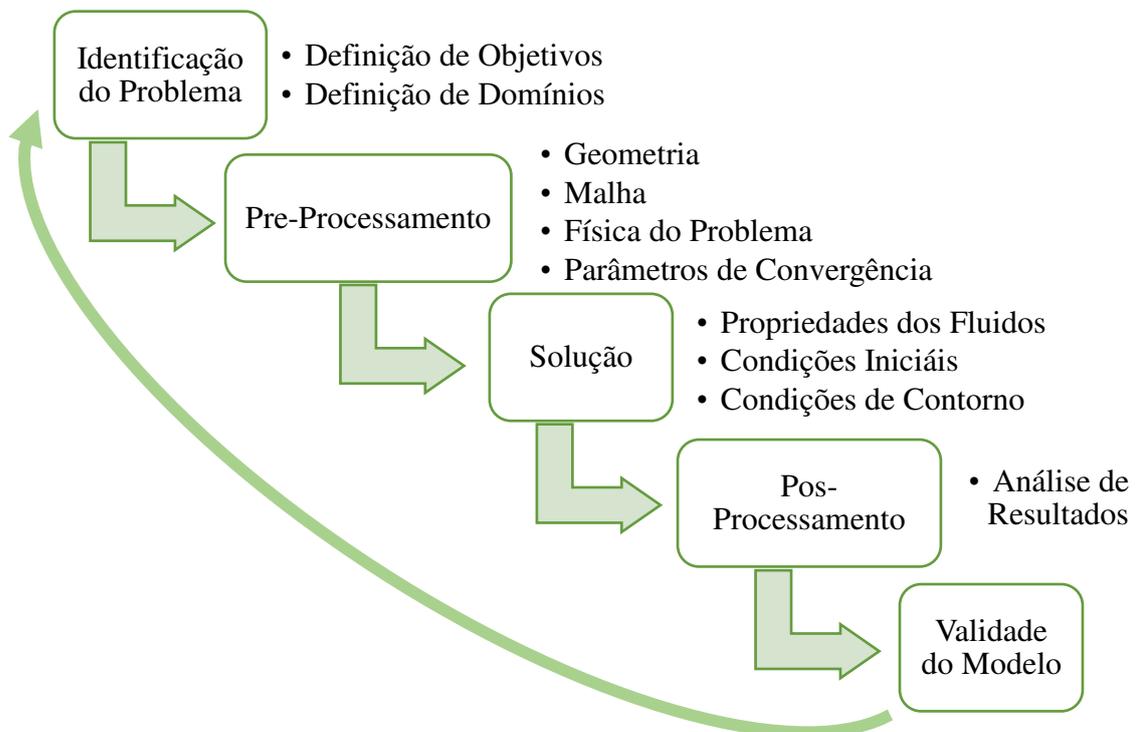


Figura 3. 1 – Metodologia Computacional

A metodologia inicia com a definição de objetivos e o domínio a ser estudado. Posteriormente é construída a geometria e a malha. A solução das equações utilizadas será obtida a partir da aplicação de métodos numéricos (discretização) com o intuito de encontrar uma resposta em cada célula da malha. Após obter os resultados, estes serão pós-processados para obter quantidades de interesse, validar o modelo 3D e estabelecer a exatidão do mesmo. Finalmente, o modelo validado deve representar adequadamente o fenômeno estudado. No caso que o modelo não cumpra os objetivos, as etapas do pré-processamento devem ser revisadas.

3.1 Identificação do problema

O objetivo principal do trabalho é o estudo do comportamento fluidodinâmico da mistura de óleo pesado e nafta em um misturador estático helicoidal. Variáveis como o grau de homogeneização dos fluidos (CoV) e a queda de pressão (ΔP) no equipamento serão analisadas com o uso de CFD.

O misturador estático consta de uma tubulação com elementos helicoidais estáticos no interior. A Figura 3.2 mostra o domínio escolhido, o qual faz parte de um sistema de mistura. A geometria considera as dimensões do misturador estático estudado por Alberini F. *et al.*, (2013).

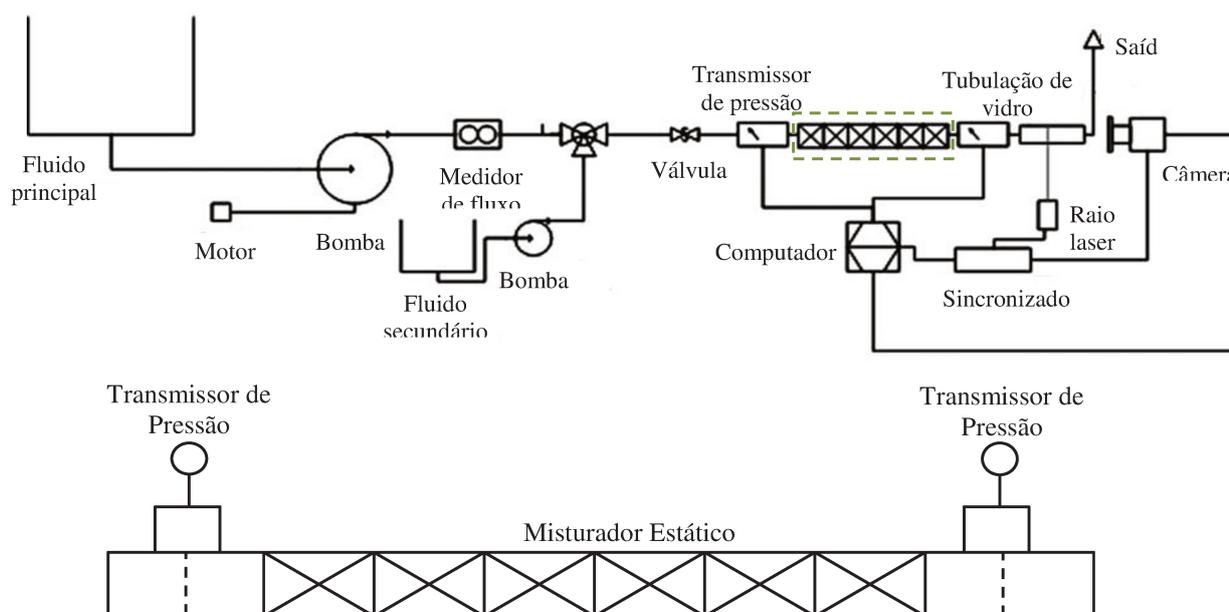


Figura 3. 2 – Esquema do sistema e domínio escolhido. Adaptado de ALBERINI F. *et al.*,(2013).

3.2 Pré-Processamento

Na metodologia utilizada em CFD a seguinte etapa é a de Pré-Processamento, a qual considera a construção da geometria, geração da malha e a definição das condições iniciais, condições de contorno e modelos matemáticos. O modelo tridimensional foi criado considerando as características geométricas, condições iniciais e propriedades dos fluidos mostrados em Alberini F. et al., (2013).

3.2.1 Construção da Geometria

O desenho das geometrias do misturador estático helicoidal foi realizado com o software *Design Modeler* de ANSYS CFX 17.02. A geometria criada é um modelo 3D, a qual considerou as dimensões mostradas por Alberini F. *et.al.* (2013). A Figura 3.3 detalha a configuração geométrica do misturador estático.

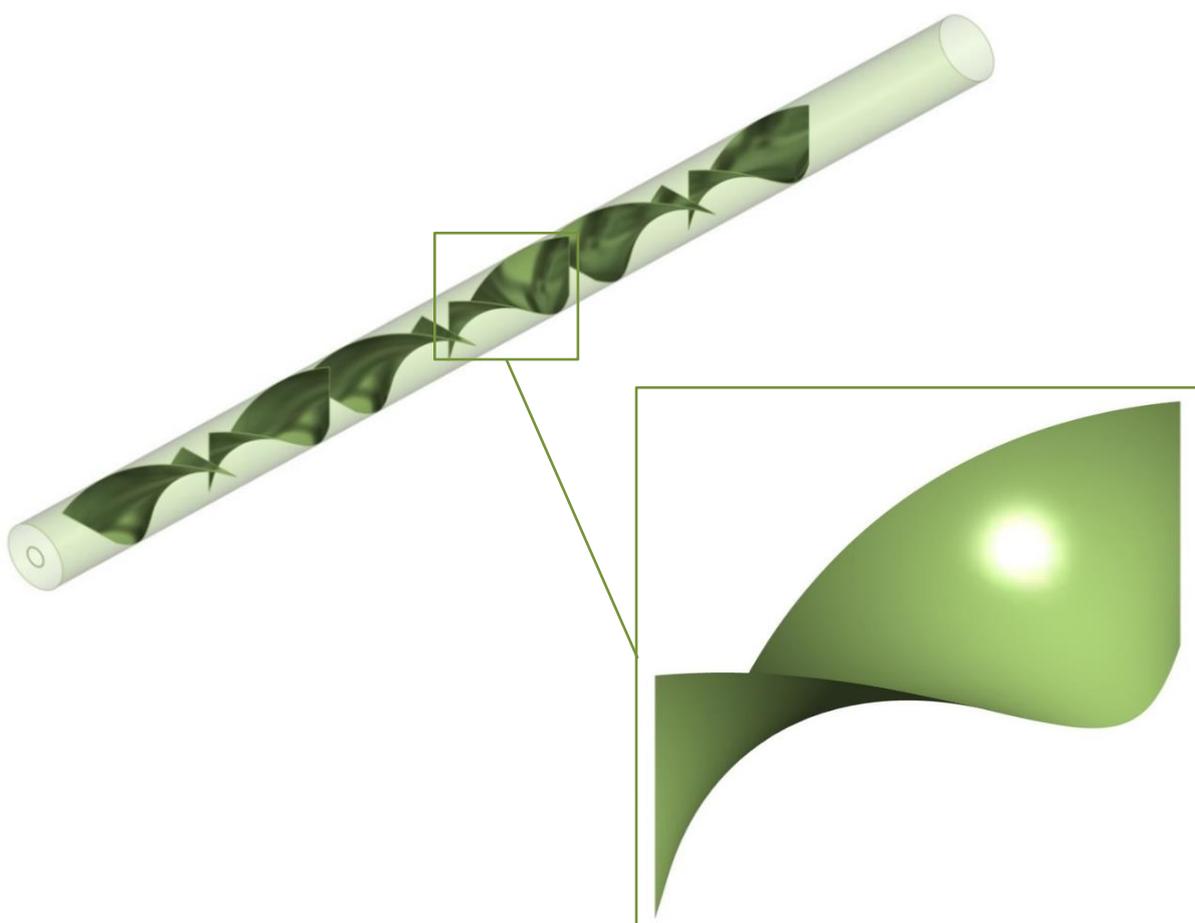


Figura 3. 3 – Configuração geométrica.

Cada elemento de mistura é rotado 180° sobre seu próprio eixo e encontra-se numa posição de 90° respeito do elemento seguinte. A Tabela 3.1 mostra as dimensões da configuração geométrica, mostrando o comprimento da tubulação, do misturador estático, o diâmetro interno e a rotação de cada elemento de mistura.

Tabela 3. 1– Dimensões do sistema estudado

Dimensões da geometria		
Comprimento Misturador	6 Elementos	0,17 [m]
	12 Elementos	0,44 [m]
Comprimento Tubulação (L)	6 Elementos	0,27 [m]
	12 Elementos	0,54 [m]
Diâmetro Interno (D)	6 Elementos	0,0127 [m]
	12 Elementos	0,0127 [m]
Elemento de Mistura	Comprimento	0,02833 [m]
	Rotação	180°

3.2.2 Geração de Malha

No presente trabalho construíram-se malhas tetraédricas utilizando o *Meshing* do software ANSYS CFX 17.02. As malhas geradas apresentam refinamento com prismas nas paredes do misturador estático, permitindo que a física do problema seja representada adequadamente na camada limite (Maliska, 1995). O resto do misturador estático foi refinado com tetraedros. A Figura 3.4 detalha a malha gerada para 6 elementos de mistura. Todas as malhas apresentam refinamento nos elementos de mistura como é apresentado na Figura 3.4 (a). Nesta figura é possível ver o refino que foi aplicado na camada limite em todos os elementos de mistura, para captar corretamente os perfis de velocidade e concentração. Da mesma forma foi usado este refino nas paredes da tubulação (Figura 3.4b).

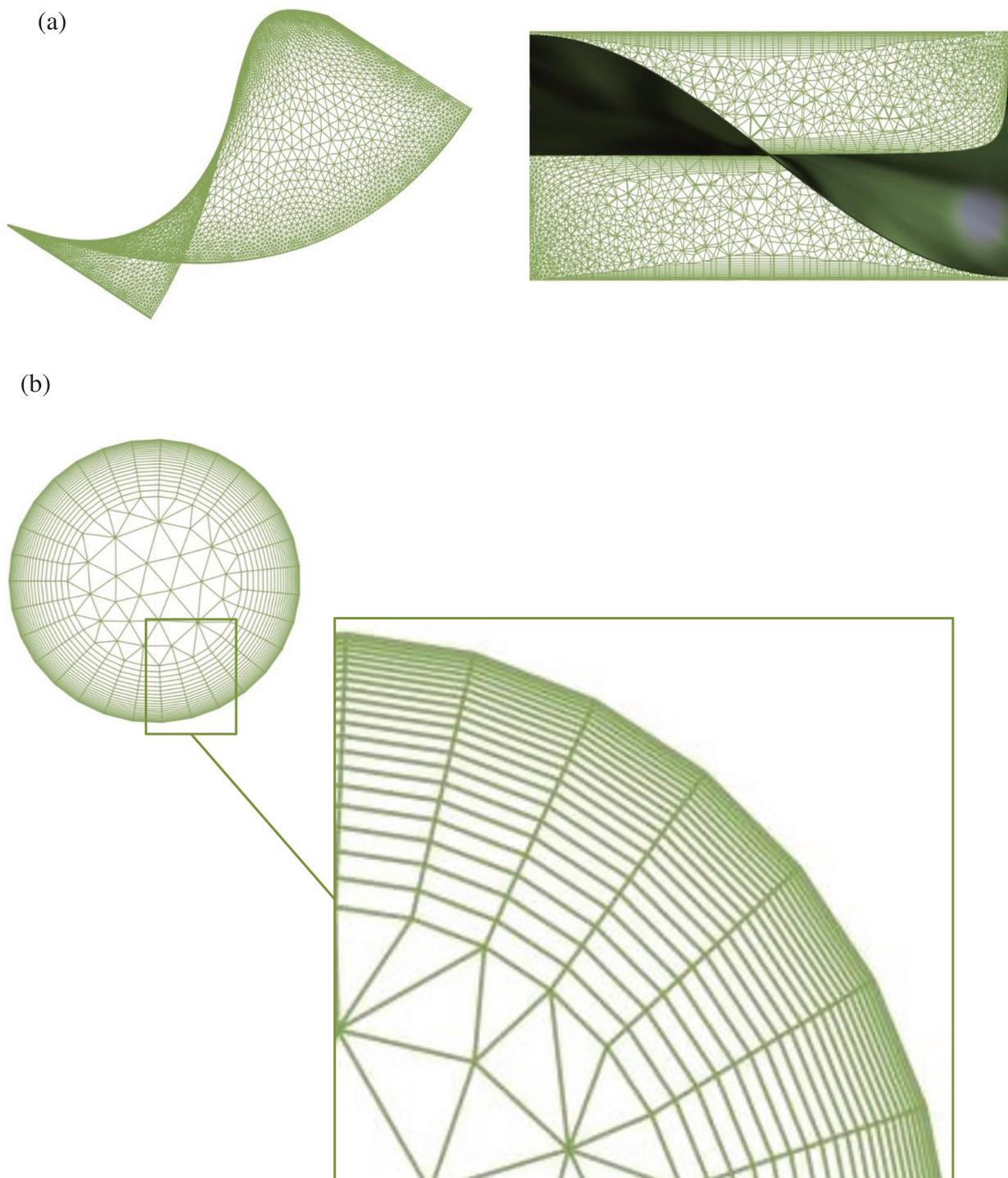


Figura 3. 4 – Malha do misturador estático helicoidal de 6 elementos de mistura. (a) Malha dos elementos de mistura. (b) Malha na parede da tubulação.

3.2.3 Modelos e Métodos

Após a construção da geometria e a malha, é necessário definir as condições iniciais e de contorno, propriedades dos materiais e modelos físicos a serem utilizados nas simulações.

3.2.3.1 Propriedades físicas dos fluidos

Para o desenvolvimento do presente trabalho consideraram-se três fluidos Newtonianos e dois fluidos não Newtonianos. Os fluidos Newtonianos são uma solução aquosa de Glicerol (Fluido 1), um óleo pesado (Fluido 4) e nafta (Fluido 5). Os fluidos não Newtonianos são uma solução aquosa do polímero Carbopol 940 em concentrações de 0,1% (Fluido 2) e 0,2% (Fluido 3). O Comportamento reológico do fluido não Newtoniano é descrito pelo modelo de Herschel-Bulkley, para valores de taxa de deformação $0,1 [s^{-1}] < \dot{\gamma} < 1000 [s^{-1}]$, conforme sugerido por Alberini F. *et al.*, (2013). Para o desenvolvimento do projeto utilizou-se um modelo estacionário para a mistura do Glicerol e a mistura dos hidrocarbonetos e um modelo de falso transiente para a mistura do Carbopol 940. Os modelos consideram as propriedades dos fluidos e condições experimentais propostas em Alberini F. *et al.*, (2013).

A Tabela 3.2 apresenta as propriedades físicas dos fluidos que se utilizaram no desenvolvimento das simulações. O Fluido 3 mostra uma diferença considerável na viscosidade em relação aos Fluidos 1 e 2.

Tabela 3. 2 – Propriedades físicas dos fluidos de trabalho.

Propriedade Fluido de estudo	Densidade ρ [kg m ⁻³]	Yield Stress τ_0 [Pa]	Lei de potencia Exp, n [-]	Índice de consistência k , [Pa s ^{n}]	Viscosidade μ [Pa s]	pH (-)	Re (-)
Fluido 1 80% p/p Glicerina	1200	-	-	-	0,05	-	88
Fluido 2 0,1% p/p Carbopol 940	1000	3,2	0,7	0,26	0,05	4,5	88
Fluido 3 0,2% p/p Carbopol 940	1000	25,2	0,42	6,74	0,20	5	91

Adaptado de Alberini F. *et al.*, (2013).

A Tabela 3.3 apresenta os três estudos de caso propostos, os quais utilizam o Glicerol e o Carbopol 940 como fluidos de trabalho. Cada estudo de caso constituiu-se por um fluido primário e um fluido secundário. Para os estudos de Caso N°1 e N°2, o fluido secundário considera-se igual ao fluido primário, somente no estudo de Caso N°3 o fluido primário corresponde ao Fluido 2 e o secundário ao Fluido 3.

Tabela 3. 3 – Estudos de Caso.

Estudo de Caso	N°1	N°2	N°3
Fluidos			
Primário	Fluido 1	Fluido 2	Fluido 2
Secundário	Fluido 1	Fluido 2	Fluido 3

Adaptado de Alberini F. *et al.*, (2013).

Com o intuito de aplicar o modelo de simulação desenvolvido no processo de diluição de óleo pesado, se realizou a mistura de dois hidrocarbonetos, sendo um óleo pesado e um óleo leve. Estes fluidos são normalmente misturados no processo de diluição de hidrocarbonetos, com o intuito de diminuir a viscosidade do óleo pesado para facilitar o transporte do recurso. A Tabela 3.4 apresenta as propriedades físicas dos fluidos utilizados no estudo de Caso N°4 (Davudov D. & Ghanbarnezhad M. R. (2017)).

Tabela 3. 4 – Propriedades dos fluidos hidrocarbonetos utilizados na segunda etapa.

Propriedade	Densidade ρ [kg m ⁻³]	Gravidade °API	Viscosidade do Fluido μ [cp]
Estudo de Caso N°4			
Fluido 4 (Óleo Pesado) Fluido Primário	953,5	16,9	13.140,0
Fluido 5 (Óleo Leve) Fluido Secundário	880,0	28,3	22,0

Adaptado de Davudov D. & Ghanbarnezhad M. R. (2017).

3.2.3.2 Condições de Contorno

As condições de contorno e suposições utilizadas neste trabalho, considerando estado estacionário e falso transiente, são listadas a seguir:

- As velocidades são constantes e diferentes para os fluidos primário e secundário. Para o fluido primário, a velocidade considerada é de 0,389 [m/s] que corresponde a uma vazão de líquido de 160 [L/h]. A velocidade do fluido secundário é 0,689 [m/s] com uma vazão de 24 [L/h].
- Como foi apresentado na Tabela 3.3, o fluido secundário é o mesmo fluido primário para os estudos de Caso N°1 e N°2 (Fluido 1 e Fluido 2 respectivamente). Para o estudo de Caso N°3, o fluido secundário é diferente do primário, sendo que o Fluido 2 é o fluido primário e o Fluido 3 o secundário.
- Considera-se um sistema monofásico constituído por dois componentes, fluido primário e fluido secundário, os quais são injetados na entrada do misturador estático. Os fluidos entram de forma concêntrica no misturador estático, como mostrado na Figura 3.5. A cor vermelha corresponde ao fluido primário e a cor azul corresponde ao fluido secundário.

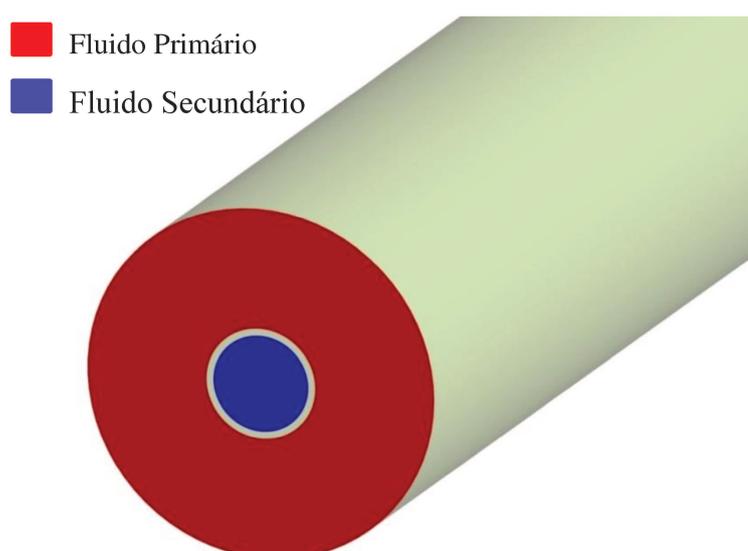


Figura 3. 5 – Entrada dos fluidos ao misturador estático

- Foi assumida uma pressão média na saída do misturador com um valor de zero. Esta condição foi mantida para todos os estudos de caso simulados. Considerou-se condição isotérmica em todo o sistema.
- Nas paredes do misturador estático e a parede da tubulação considera-se a condição de parede de não escorregamento (*No Slip Wall*), a qual estabelece diminuição da velocidade nas regiões próximas às paredes do equipamento. Quando o fluido se encontra em contato com as paredes, a condição de não escorregamento atribui uma velocidade igual zero.
- A viscosidade e a densidade foram consideradas semelhantes às encontradas em Alberini F. *et al.*, (2013) e Davudov D. & Ghanbarnezhad M. R. (2017), as quais foram apresentadas na Tabela 3.3 e 3.4.
- As simulações do estudo de Caso N°1 foram realizadas em estado estacionário. Para as simulações dos estudos de Caso N°2 e N°3 foi utilizada uma abordagem de falso transiente para facilitar a convergência. Os estudos de caso com abordagem de falso transiente são simulados desde um estado inicial (considerando as condições estabelecidas anteriormente) até atingir um padrão homogêneo de concentração na saída do misturador estático.

3.3 Solução

Posterior à definição do problema se estabelece a solução numérica do modelo utilizando o *Solver* do *Software* ANSYS CFX 17.02, que é baseado no Método dos Volumes Finitos baseados em elementos, descrito na seção 2.7.2. A partir do pré-processamento, o *software* ANSYS CFX provê todas as soluções das equações necessárias para realizar as simulações do problema especificado, além de plotar continuamente os gráficos do residual de cálculo durante a solução do problema, mostrando a convergência.

A solução dada pelo software ANSYS CFX 17.02 é dada a partir de valores iniciais inseridos pelo usuário. Os erros nos balanços de massa e momento são calculados para cada célula do domínio considerando os valores iniciais utilizados. Os balanços são realizados até que o erro seja tão pequeno quanto o valor previamente definido. No presente trabalho considera-se um erro menor que 1×10^{-5} .

3.4 Pós-Processamento

A etapa de pós-processamento é a etapa final da metodologia utilizada em CFD. Ansys CFX-Post foi usado para analisar em detalhe os resultados obtidos a partir do *Solver*. Todas as análises realizadas são apresentadas no Capítulo 4.

3.4.1 Validação do Modelo

Com o intuito de validar o modelo proposto foram realizadas simulações usando a configuração experimental encontrada em Alberini F. et. Al. (2013). As condições de operação e a configuração geométrica foram tomadas deste trabalho experimental. Os casos estudados na validação são especificados nas Tabelas 3.3 e 3.4 da seção 3.2.3.1.

Capítulo 4

Resultados

O capítulo de resultados apresenta as análises realizadas a partir das simulações obtidas para o misturador estático helicoidal. Neste capítulo foi estudada a convergência da simulação e foi realizado um teste de independência de malha com o intuito de determinar a malha adequada para o desenvolvimento do projeto. O modelo 3D proposto foi validado a partir de dados experimentais e testado para o Carbopol 940 e o Glicerol. Posteriormente, o modelo 3D foi avaliado na mistura de um óleo pesado e um óleo leve. Estes fluidos são comumente utilizados na diluição de óleo pesado o qual é um processo importante no transporte de hidrocarbonetos na indústria petroleira. Para as misturas de fluidos consideradas foram estudadas variáveis como a eficiência de mistura com o cálculo do coeficiente de variação CoV e a queda de pressão em relação ao fator K_L . Variáveis como a velocidade dentro do misturador estático e a influência da geometria no resultado do CoV foram também analisadas.

4.1 Critérios de parada

Os critérios de parada são analisados em uma simulação com o intuito de garantir a convergência e desta forma obter resultados adequados. Para o desenvolvimento deste trabalho consideraram-se dois critérios de parada: os valores de erro residual RSM (baseado nos erros residuais das simulações numéricas das equações de momento e continuidade) e os erros globais para os balaços das equações de continuidade e momento.

O valor do RSM estabelecido como critério de parada é 1×10^{-5} . Todos os valores do RSM estão abaixo do valor estabelecido como critério de parada e as variáveis atingiram uma estabilidade. Para o erro global o valor estabelecido é de 0,01 (1%). Portanto todos os valores do erro global para os balanços das equações de continuidade e momento devem estar abaixo de 1%.

Uma abordagem estacionaria foi considerada para o caso da mistura do Glicerol e da mistura de óleo pesado com óleo leve. No caso da mistura de Carbopol 940 0,1% p/p e a mistura de Carbopol 940 0,2% p/p se considerou uma abordagem de falso transiente para facilitar a convergência das simulações, mas o regime continua sendo estacionário. As simulações foram iteradas até que os campos de velocidade e de concentração atingissem valores adequados.

4.2 Estudo de independência de malha – efeito do refinamento da malha sobre o coeficiente de variação CoV.

Uma solução dada a partir de uma malha apropriada permitirá obter resultados com maior precisão, por tanto o fenômeno físico será representado de forma adequada. Com o intuito de determinar a independência do tamanho da malha com a solução foi realizado um teste de malha. Foram realizadas 6 simulações com diferentes densidades de malha para um misturador estático com 6 e 12 elementos. Considerou-se uma densidade de malha para as simulações com o fluido Newtoniano e uma mais refinada para os casos com o fluido não Newtoniano. As Tabelas 4.1 e 4.2 correspondem ao teste de malha para o fluido Newtoniano com 6 e 12 elementos de mistura, respectivamente. As Tabelas 4.3 e 4.4 correspondem ao teste de malha para o fluido não Newtoniano com 6 e 12 elementos de mistura, respectivamente.

O teste de malha considerou o cálculo do coeficiente de variação CoV buscando que o valor seja independente do refinamento da malha. Cada malha gerada apresenta uma variação do tamanho do primeiro prisma e camadas de primas entre 15 e 20.

Tabela 4. 1 – Parâmetros de malha utilizados no misturador estático com 6 elementos de mistura Estudo de Caso N°1.

Parâmetros	Níveis de malha					
	1	2	3	4	5	6
Camada de Prismas	20	15	20	20	20	20
Taxa de Crescimento	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Elementos da Malha	$1,66 \times 10^6$	$3,32 \times 10^6$	$3,31 \times 10^6$	$3,32 \times 10^6$	$3,40 \times 10^6$	$3,51 \times 10^6$
Altura da Primeira Camada	$4,40 \times 10^{-4}$	$4,00 \times 10^{-4}$	$4,40 \times 10^{-4}$	$4,00 \times 10^{-4}$	$3,00 \times 10^{-4}$	$2,00 \times 10^{-4}$
CoV	0,03	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16

Tabela 4. 2– Parâmetros de malha utilizados no misturador estático com 12 elementos de mistura Estudo de Caso N°1.

Parâmetros	Níveis de malha					
	1	2	3	4	5	6
Camada de Prismas	20	15	20	20	20	20
Taxa de Crescimento	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Elemento da Malha	$2,81 \times 10^6$	$2,91 \times 10^6$	$4,44 \times 10^6$	$5,31 \times 10^6$	$5,41 \times 10^6$	$5,51 \times 10^6$
Altura da Primeira Camada	$3,80 \times 10^{-3}$	$5,00 \times 10^{-3}$	$3,00 \times 10^{-4}$	$6,00 \times 10^{-5}$	$5,00 \times 10^{-5}$	$4,00 \times 10^{-5}$
CoV	0,01	0,02	0,03	0,09	0,09	0,09

Tabela 4. 3 – Parâmetros de malha utilizados no misturador estático com 6 elementos de mistura para o Estudo de Caso N°2.

Parâmetros	Níveis de malha					
	1	2	3	4	5	6
Camada de Prismas	10	15	15	20	20	20
Taxa de Crescimento	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Elemento da Malha	$4,10 \times 10^6$	$4,50 \times 10^6$	$5,10 \times 10^6$	$5,54 \times 10^6$	$5,85 \times 10^6$	$6,10 \times 10^6$
Altura da Primeira Camada	$5,20 \times 10^{-5}$	$5,20 \times 10^{-5}$	$4,40 \times 10^{-5}$	$4,47 \times 10^{-5}$	$4,10 \times 10^{-5}$	$3,90 \times 10^{-5}$
CoV	0,16	0,18	0,21	0,27	0,27	0,27

Tabela 4. 4 – Parâmetros de malha utilizados no misturador estático com 12 elementos de mistura para o Estudo de Caso N°2.

Parâmetros	Níveis de malha					
	1	2	3	4	5	6
Camada de Prismas	20	15	15	20	20	20
Taxa de Crescimento	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Elemento da Malha	$2,10 \times 10^6$	$2,90 \times 10^6$	$3,00 \times 10^6$	$3,55 \times 10^6$	$3,73 \times 10^6$	$3,65 \times 10^6$
Altura da Primeira Camada	$2,50 \times 10^{-4}$	$4,50 \times 10^{-4}$	$3,50 \times 10^{-4}$	$2,00 \times 10^{-4}$	$1,50 \times 10^{-4}$	$1,70 \times 10^{-4}$
CoV	0,01	0,03	0,06	0,09	0,09	0,09

Para o fluido Newtoniano, as malhas que apresentam a melhor predição são as malhas 3 e 4 mostradas nas Tabelas 4.1 e 4.2, respectivamente. As malhas foram geradas para $L/D = 21$ e $L/D = 42$. A malha 3 está constituída por $3,31 \times 10^6$ elementos de malha e a malha 4 apresenta $5,31 \times 10^6$ elementos de malha. Para o caso dos fluidos não-Newtonianos, as malhas utilizadas são as malhas 5 e 4 representadas nas Tabelas 4.3 e 4.4. As malhas 5 e 4 estão formadas por $5,54 \times 10^6$ elementos e $3,55 \times 10^6$ elementos de malha respectivamente. As malhas foram escolhidas considerando dos aspectos: a representação adequada do fenômeno estudado e o baixo custo computacional.

Ansys CFX permite avaliar a qualidade de malha a partir da análise de vários parâmetros entre eles, qualidade do elemento, relação de triangulação ou quadriláteros, relação Jacobiano, fator Warping, desvio paralelo, skewness e qualidade ortogonal. Para avaliar a qualidade de malha no presente trabalho, foi utilizado o parâmetro de qualidade ortogonal. Este parâmetro considera valores entre 0 e 1, onde 0 representa baixa qualidade de malha e 1 representa alta qualidade de malha. A qualidade de malha ortogonal para cada célula é calculada considerando o vetor normal da face (\vec{A}_1 , \vec{A}_2 e \vec{A}_3), o vetor normal desde o centroide da célula até o centroide de cada célula adjacente (\vec{C}_1 , \vec{C}_2 e \vec{C}_3), e o vetor desde o centroide da célula até o centroide de cada face (\vec{f}_1 , \vec{f}_2 e \vec{f}_3) (ANSYS CFX 17.02). A Figura 4.1 representa os vetores usados para determinar a qualidade ortogonal de uma célula.

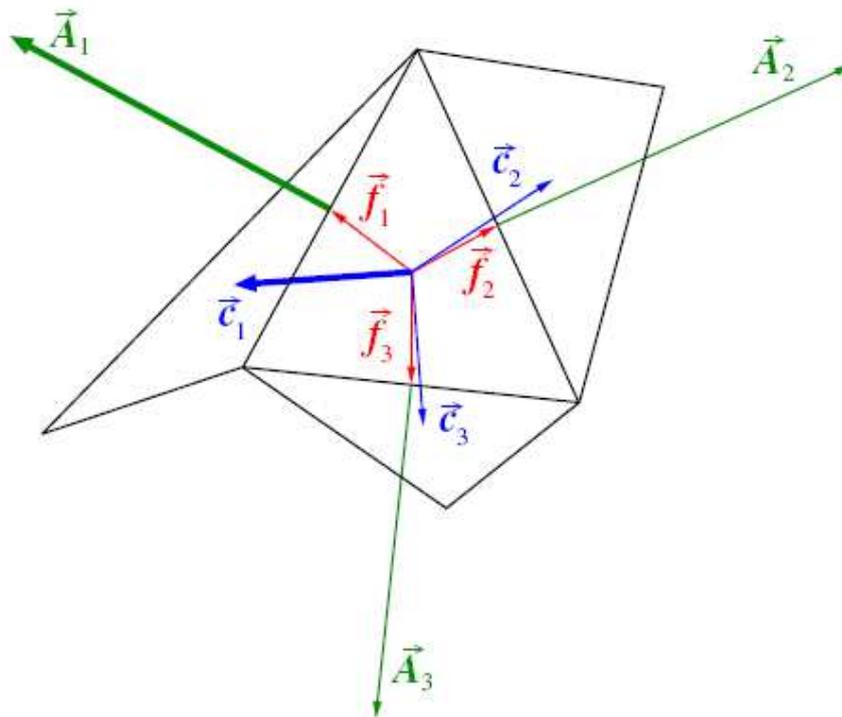


Figura 4. 1 – vetores para determinar a qualidade ortogonal de uma célula

O cálculo da qualidade da malha a partir do parâmetro de ortogonalidade para cada face i é realizado considerando a seguinte formulação:

$$\frac{\vec{A}_i \cdot \vec{f}_i}{|\vec{A}_i||\vec{f}_i|} \quad (4.1)$$

Sendo \vec{A}_i o vetor normal da face e \vec{f}_i o vetor desde o centroide da célula até o centroide da face.

$$\frac{\vec{A}_i \cdot \vec{C}_i}{|\vec{A}_i||\vec{C}_i|} \quad (4.2)$$

Sendo \vec{C}_i o vetor normal desde o centroide da célula até o centroide da célula adjacente que compartilha a face.

O parâmetro de ortogonalidade para as malhas utilizadas no presente trabalho apresentou um valor de 0,99987 e 0,8897 na maior parte das células da malha.

4.3 Validação do modelo 3D

O modelo de simulação proposto para o misturador estático helicoidal validou-se a partir da comparação dos resultados obtidos através da simulação com resultados experimentais encontrados em Alberini F. et al., (2014). A validação realizou-se com a análise de duas variáveis: o coeficiente de variação CoV e a queda de pressão em relação ao fator K. A Figura 4.2 apresenta o coeficiente de variação CoV para o estudo de Caso N°1, o qual foi escolhido para a validação. Os resultados da simulação são representados pela linha de cor azul. Estes apresentam proximidade com os resultados experimentais (linha azul), o que permite inferir que o modelo de simulação proposto é condizente com a literatura e representa de forma adequada o fenômeno estudado. As diferenças percentuais entre valores de simulação e valores experimentais encontrados foram de 1,92% para o misturador estático com 6 elementos de mistura e de 2,24% para o misturador estático com 12 elementos de mistura.

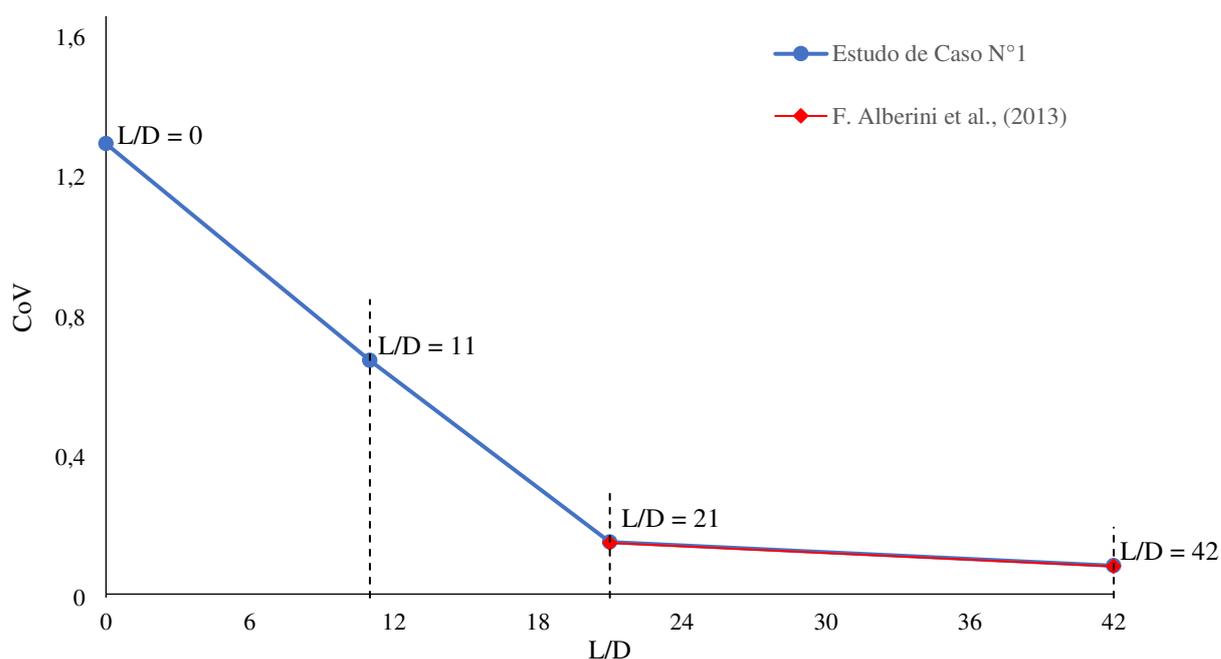


Figura 4. 2 – CoV para 3, 6 e 12 elementos de mistura nos estudos de Caso N°1

A Tabela 4.5 apresenta a queda de pressão e o fator K_L para o misturador estático helicoidal com 12 elementos de mistura para o estudo de Caso N°1. Estes valores de queda de pressão são comparados com os dados de Alberini F. et al., (2013) encontrando similaridade entre resultados de simulação e resultados experimentais. Esta similaridade permite afirmar que o modelo 3D proposto representa adequadamente o fenômeno estudado.

O fator K_L obtido a partir da simulação foi comparado com o valor experimental encontrado em Alberini F. et al., (2013). De igual forma o fator K_L foi comparado com o valor encontrado na literatura para esse tipo de misturador estático específico, encontrando similaridade entre os resultados e desvios entre 1,4% e 2,9%.

Tabela 4. 5 – Comparação de dados experimentais e de simulação da queda de pressão e fator K_L

ΔP		ΔP [Pa]		K_L Calculado		K_L	Desvio	
Tubo vazio [Pa]						Literatura		
Sim.	Expe.	Sim.	Expe.	Sim	Expe	(ETCHELLS III & MEYER, 2004)	Sim	Expe.
1480	1200	9850	8122	6,8	6,7	6,9	0,014	0,029

4.4 Mistura de Glicerol e mistura de Carbopol 940.

A mistura de Glicerol e a mistura de Carbopol 940 foram analisadas no presente trabalho. Considerou-se os estudos de Caso descritos na seção 3.2.3.1 do Capítulo 3, Tabela 3.3. Para os três casos de misturas estudou-se o coeficiente de variação CoV e a queda de pressão e o fator K_L . O CoV foi calculado a partir dos valores de fração mássica do fluido secundário, os quais foram obtidos de perfis transversais localizados na saída do misturador estático. Os valores de CoV também foram obtidos em vários pontos ao longo do misturador estático com o intuito de analisar o progresso da mistura no interior do equipamento.

A Figura 4.3 apresenta os valores do coeficiente de variação CoV para 3, 6, 12 e 14 elementos de mistura que corresponde a um comprimento de $L/D = 11$, $L/D = 21$, $L/D = 42$ e $L/D = 49$, respectivamente. Nesta figura é possível observar a diminuição do CoV através do misturador estático para os estudos de Caso N°1, N°2 e N°3. A diminuição do CoV permite corroborar que existe movimento dos fluidos proporcionado pelos elementos de mistura e pela energia de bombeamento. Os mecanismos de mistura por advecção e difusão são considerados relevantes em um processo de mistura. No presente trabalho determinou-se que o mecanismo de mistura dominante no processo é a advecção devido à natureza viscosa dos fluidos de trabalho (ALBERINI F. *et al.*, 2013). As linhas verde, azul e laranja na figura corresponde aos valores de CoV para o estudo de Caso N°1, N°2 e N°3, respectivamente. O estudo de caso N°1, para 6 elementos de mistura, apresenta um valor de $CoV = 0,159$, o qual é menor em relação aos valores de CoV atingidos nos estudos de caso N°2 e N°3, sendo 0,262 e 0,482,

respectivamente. O anterior é devido que os estudos de caso N°2 e N°3 utilizam um fluido não newtoniano como fluido de trabalho, por tanto apresentam uma maior dificuldade para se misturarem. A viscosidade dos fluidos não newtonianos depende da taxa de deformação, portanto para gradientes de viscosidade elevados pode existir uma mistura não ideal. Como pode ser observado na Figura 4.3 após 6 elementos de mistura, para todos os estudos de casos, o valor do CoV não atingiu o valor de $\text{CoV} \leq 0,05$ (linha vermelha). O número de elementos de mistura é um parâmetro importante no desenho e fabricação de misturadores estáticos, visto que têm uma forte influência sobre a concentração do produto final. Na medida em que o número de elementos estáticos aumenta, a mistura adquire um grau de homogeneização maior (CoV menor). Com o intuito de atingir o valor de CoV aceito na indústria, posteriormente adicionaram-se 6 elementos de mistura sendo no total 12 elementos. Após a adição dos elementos de mistura o CoV diminuiu consideravelmente mas continua sendo maior a 5%. Por tanto se realizou uma nova análise com a adição de novos elementos de mistura com o intuito de intensificar o momento e aumentar a transferência de massa, conseguindo assim um CoV adequado.

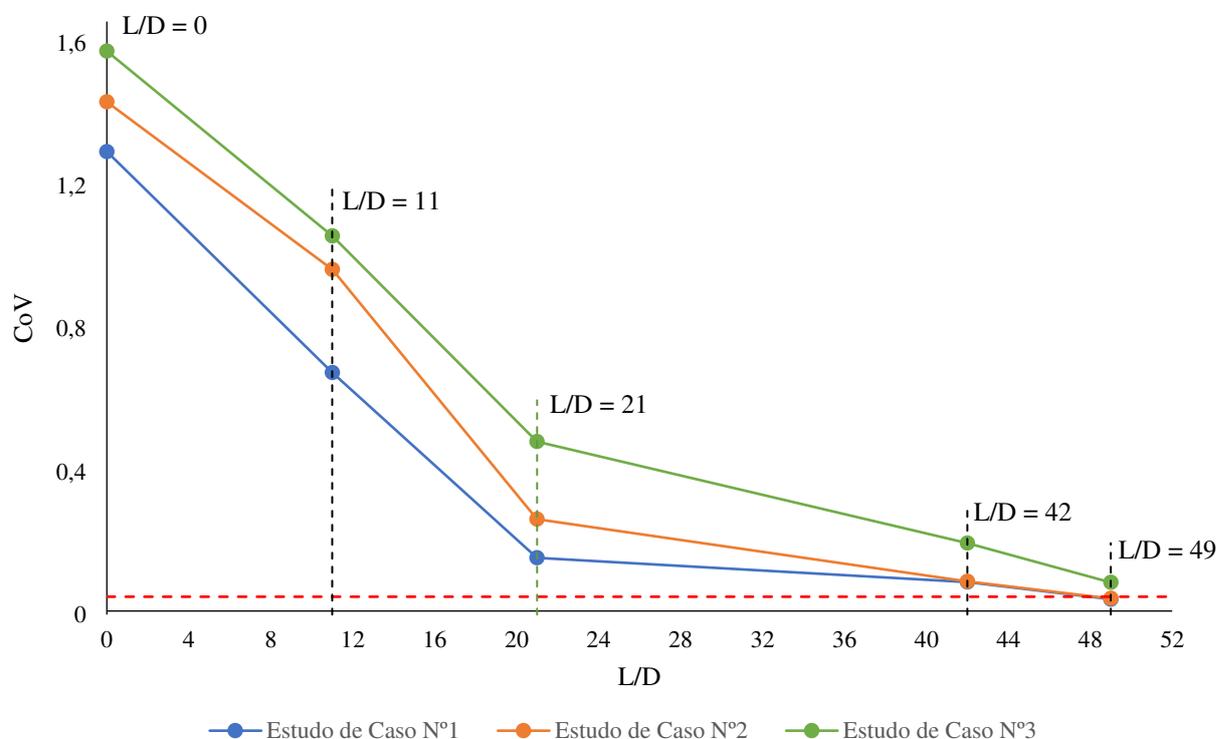


Figura 4. 3 – CoV para $L/D = 11$, $L/D = 21$, $L/D = 42$ e $L/D = 49$ correspondentes a 3, 6, 12 e 14 elementos de mistura nos estudos de Caso N°1, N°2 e N°3.

A Figura 4.3 permite analisar o coeficiente de variação para 14 elementos de mistura ($L/D = 49$). Com a adição de 2 novos elementos de mistura foi atingido um valor de $CoV = 0,043$ para o estudo de Caso N°1 e um $CoV = 0,045$ para o estudo de Caso N°2.

A Figura 4.4 apresenta os perfis transversais de concentração para os estudos de Caso N°1, N°2 e N°3 para os quais correspondem os valores de CoV mostrados na Figura 4.3. Como pode-se observar na Figura 4.4 os elementos estáticos adicionados 6, 12 e 14, permitem que o padrão de estrias formado seja menos evidente obtendo um produto mais uniforme na saída do misturador estático. Para os estudos de Caso N°1 e N°2 o número de estrias diminuiu consideravelmente após 14 elementos de mistura, obtendo um perfil de saída uniforme com um valor de CoV menor que 0,05. Em relação ao estudo de caso N°3 com 14 elementos de mistura o valor de CoV atingido continua sendo maior do que 0,05. O perfil de concentração na saída para este caso apresenta um padrão de estrias marcado em relação ao estudo de Caso N°1 e N°2 com igual número de elementos de mistura. Este comportamento se deve a que os fluidos misturados no estudo de Caso N°3 apresentam amplas diferenças na viscosidade, portanto resulta em valores de coeficiente de variação altos ($>0,05$). Para conseguir atingir um valor menor o igual a 0,05 no estudo de caso N°3 é necessária a adição de mais elementos de mistura.

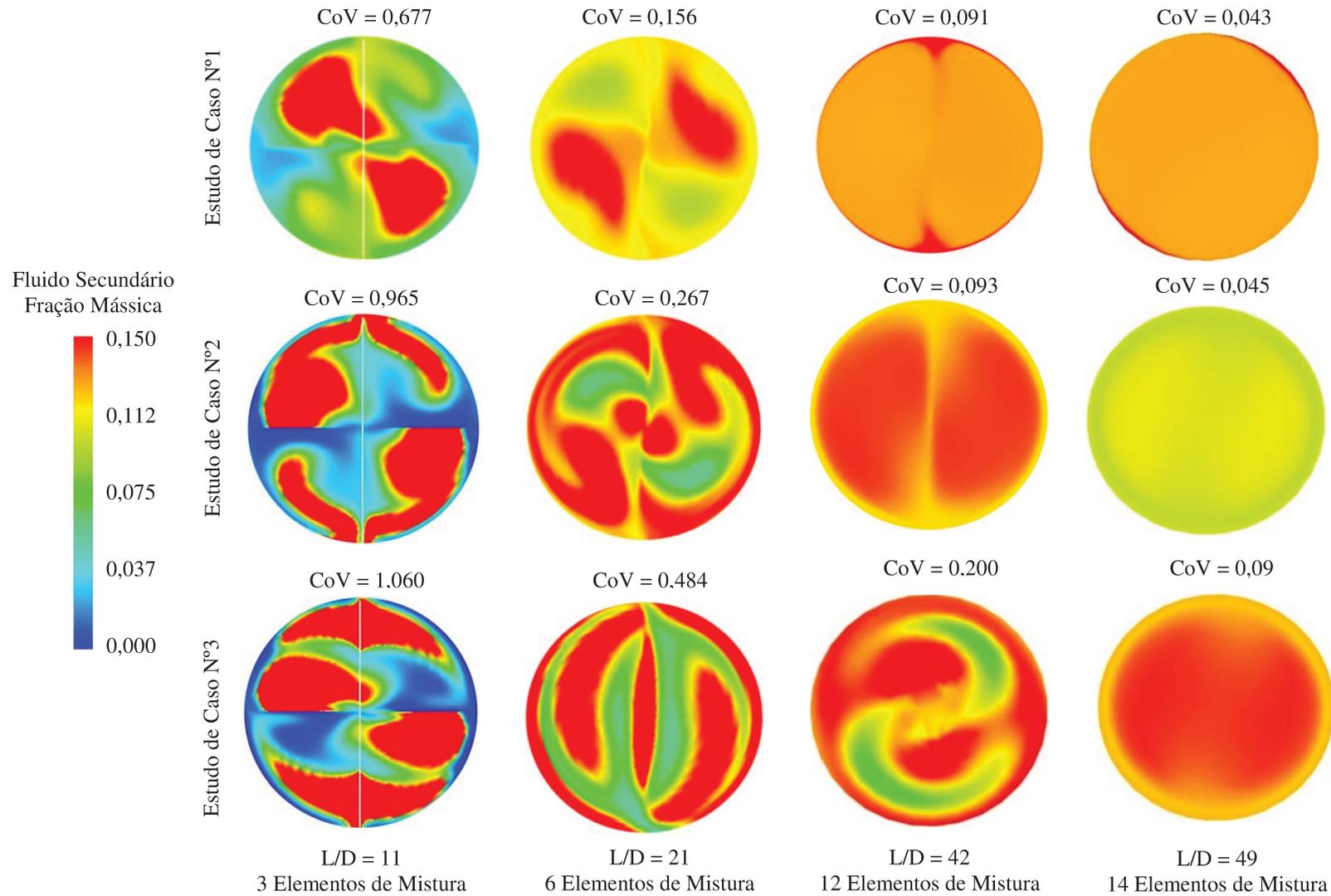


Figura 4. 4 - Perfis transversais de concentração até L/D = 49 (14 elementos de mistura) nos estudos de Caso Nº1, Nº2 e Nº3.

A Figura 4.5 apresenta os valores do coeficiente de variação no estudo de Caso N°3 com 16 elementos de mistura ($L/D = 56$). Nesta figura é possível observar o progresso da mistura através do misturador estático até um $L/D = 56$. A linha vermelha representa o valor de CoV que deve ser atingido.

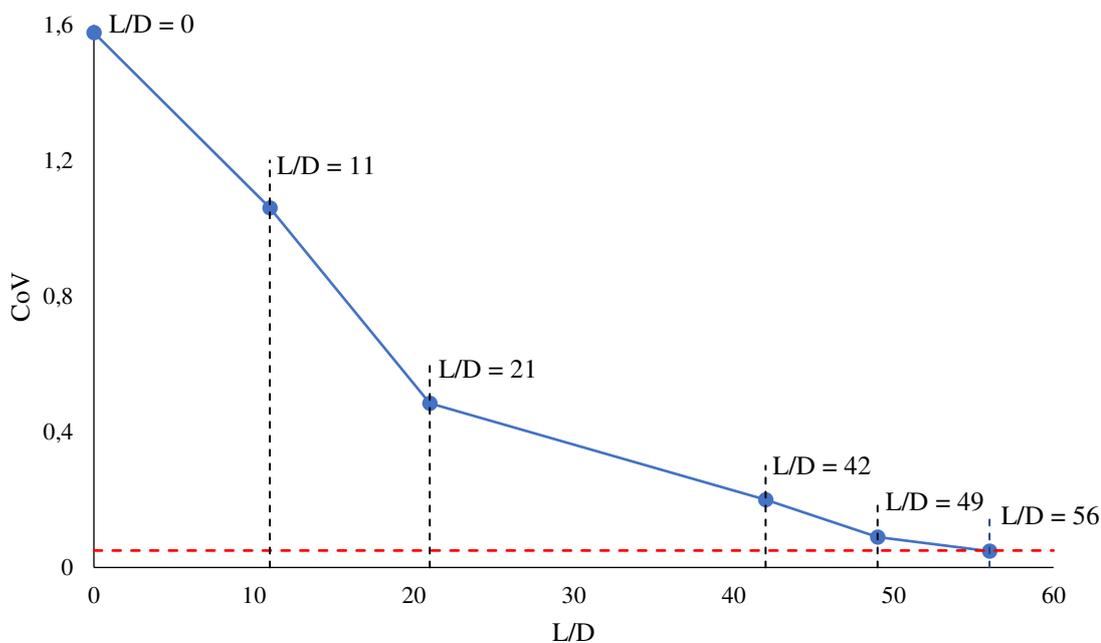


Figura 4. 5 – CoV até $L/D = 56$ (16 elementos de mistura) para os estudos de Caso N°1, N°2 e N°3.

Neste caso os perfis transversais de concentração até um $L/D = 56$ são apresentados na Figura 4.6. Como pode-se observa na Figura 4.6 com o aumento do número de elementos estáticos as estrias mostradas no início do misturador estático vão se diluindo, tornando-se menos visíveis, e mostrando uma melhor mistura. Para o estudo de Caso N°3 o valor do coeficiente de variação requerido foi atingido com 16 elementos de mistura correspondente a $L/D = 56$, obtendo um valor de $CoV = 0,048$.

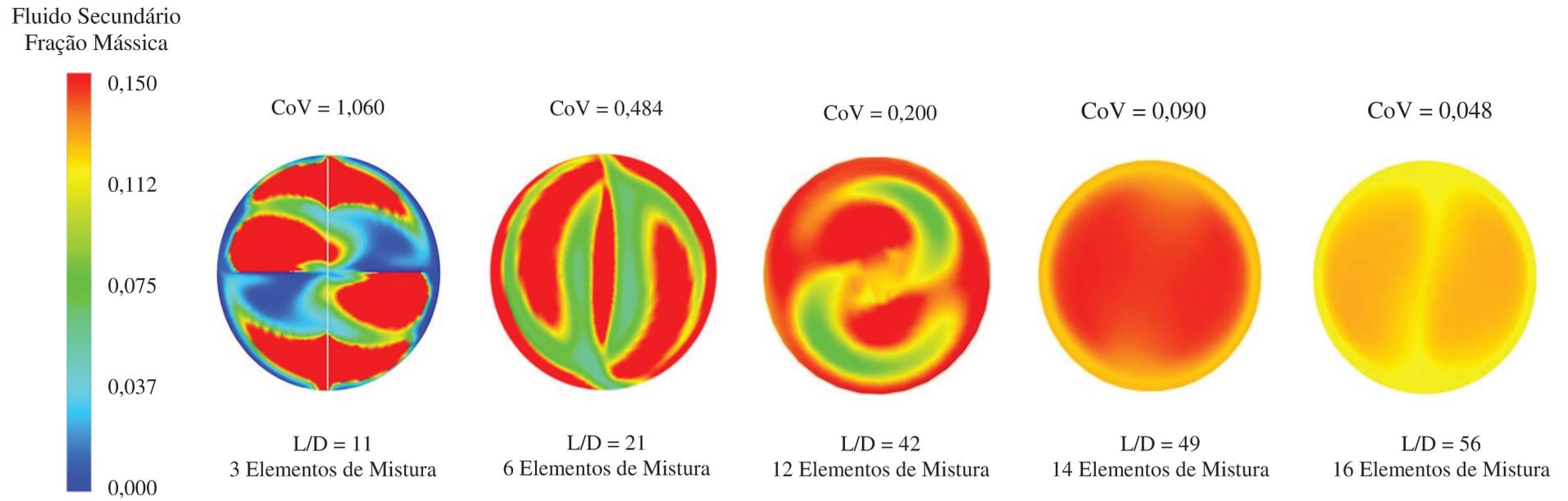


Figura 4. 6 – Perfis transversais de concentração para o estudo de Caso N°3 até L/D = 56.

A queda de pressão é estudada com o intuito de determinar a energia necessária para que os fluidos sejam misturados. Esta é uma das principais variáveis analisadas em misturadores estáticos, considerando que a energia necessária no processo representa custos de operação. A queda de pressão foi calculada para o equipamento com 6, 12 e 14 elementos de mistura, correspondentes a $L/D = 21$, $L/D = 42$ e $L/D = 49$, respetivamente. A Tabela 4.6 apresenta os resultados da queda de pressão e o fator K_L . O fator K_L é comparado com o valor encontrado na literatura para o misturador helicoidal. Nesta tabela são apresentados os valores de K_L (explicado na seção 2.2.1) que relaciona a queda de pressão no tubo sem misturador e a queda de pressão no misturador estático. O valor de K_L calculado é comparado com o valor de K_L encontrado na literatura (ETCHELLS III & MEYER, 2004) para o misturador estático helicoidal tipo *Kenics KM*. No Capítulo 2, a Tabela 2.3 apresenta os valores de K_L para vários tipos de misturadores estáticos comerciais, incluindo o *Kenics KM*. Para o estudo de caso N°1, sendo este um fluido Newtoniano, o valor de K_L apresenta concordância com o valor teórico, mostrando diferença percentual menor a 1,5%. Caso contrário ocorre com o fluido não Newtoniano nos estudos de Caso N°2 e N°3. Para o fluido não Newtoniano o valor do K_L apresenta diferenças consideráveis em relação ao valor encontrado na literatura. Os dois casos apresentam valores similares que mostram diferenças percentuais entre 26,1% e 24,6%. Embora a geometria para os estudos de caso propostos seja a mesma, as propriedades físicas dos fluidos variam o que estabelece perdas por carga diferentes em cada caso.

Tabela 4. 6 – Queda de pressão no misturador estático até $L/D = 49$.

Estudos de Caso	ΔP Tubo vazio [Pa]	ΔP [Pa]	K_L Calculado	K_L Literatura (ETCHELLS III & MEYER, 2004)	Desvio
N°1	1.680,0	11.720,0	6,8	6,9	0,015
N°2	1.495,0	7.624,0	5,1	6,9	0,261
N°3	1.520,0	8.216,0	5,2	6,9	0,246

A Figura 4.7 apresenta a queda de pressão no misturador estático para os estudos de Caso N°1, N°2 e N°3. A linha azul representa a perda de carga gerada pela mistura do fluido Newtoniano que corresponde ao estudo de Caso N°1, o qual apresenta uma densidade maior que a densidade dos fluidos utilizados nos estudos de Caso N°2 e N°3. As linhas laranja e verde correspondem os estudos de Caso N°2 e N°3, nos quais utilizou-se um fluido não

Newtoniano com duas concentrações diferentes. Nos estudos de Caso N°2 e N°3 as quedas de pressão são próximas devido à similaridade nas propriedades físicas dos fluidos de trabalho. Com a adição de elementos estáticos dentro do misturador para melhorar a homogeneização, a queda de pressão aumenta. Embora a qualidade de mistura apresentada seja adequada para o processo, a queda de pressão aumenta, gerando um maior consumo de energia.

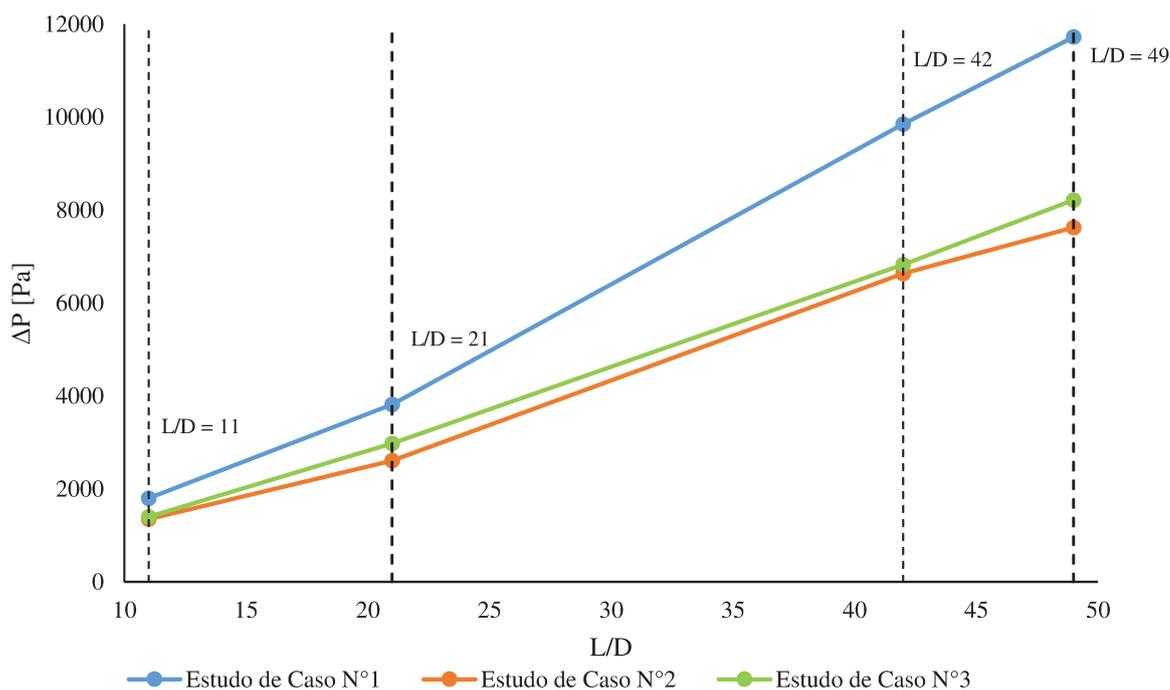


Figura 4. 7 – Queda de pressão para o misturador estático nos estudos de Caso N°1, N°2 e N°3 até L/D = 49.

Como foi observado na análise anterior para o coeficiente de variação CoV, o estudo de Caso N°3 não atingiu o valor de CoV requerido na indústria com 14 elementos de mistura. Para atingir o valor de CoV requerido foi necessário adicionar 2 elementos de mistura, tendo no total 16 elementos de mistura. A queda de pressão é mostrada na Tabela 4.7, na qual pode-se corroborar que o aumento do número de elementos estáticos aumenta a queda de pressão. O valor do fator K_L calculado neste caso também apresenta uma diferença considerável em relação ao valor encontrado na literatura.

Tabela 4. 7 – Queda de pressão no misturador estático para L/D = 56 no estudo de Caso N°3

Estudos de Caso	ΔP		K_L Calculado	K_L Literatura (ETCHELLS III & MEYER, 2004)
	Tubo vazio [Pa]	ΔP [Pa]		
N°3	1.750,0	10.125,0	5,8	6,9

O parâmetro ($CoV*\Delta P$) é utilizado para comparar misturadores estáticos em termos da capacidade de mistura e o consumo de energia. O desempenho do misturador é considerado aceitável quando o valor do parâmetro ($CoV*\Delta P$) é baixo.

A Figura 4.8 apresenta a comparação do parâmetro ($CoV*\Delta P$) para os três casos de estudo propostos no misturador estático helicoidal para L/D = 49. O desempenho mais baixo é observado no estudo de Caso N°3. A mistura de fluidos com diferenças consideráveis na viscosidade resulta em graus de homogeneização baixos. Por tanto, considerando um CoV alto e uma queda de pressão alta, o misturador estático helicoidal apresenta baixo rendimento com as condições do estudo de Caso N°3.

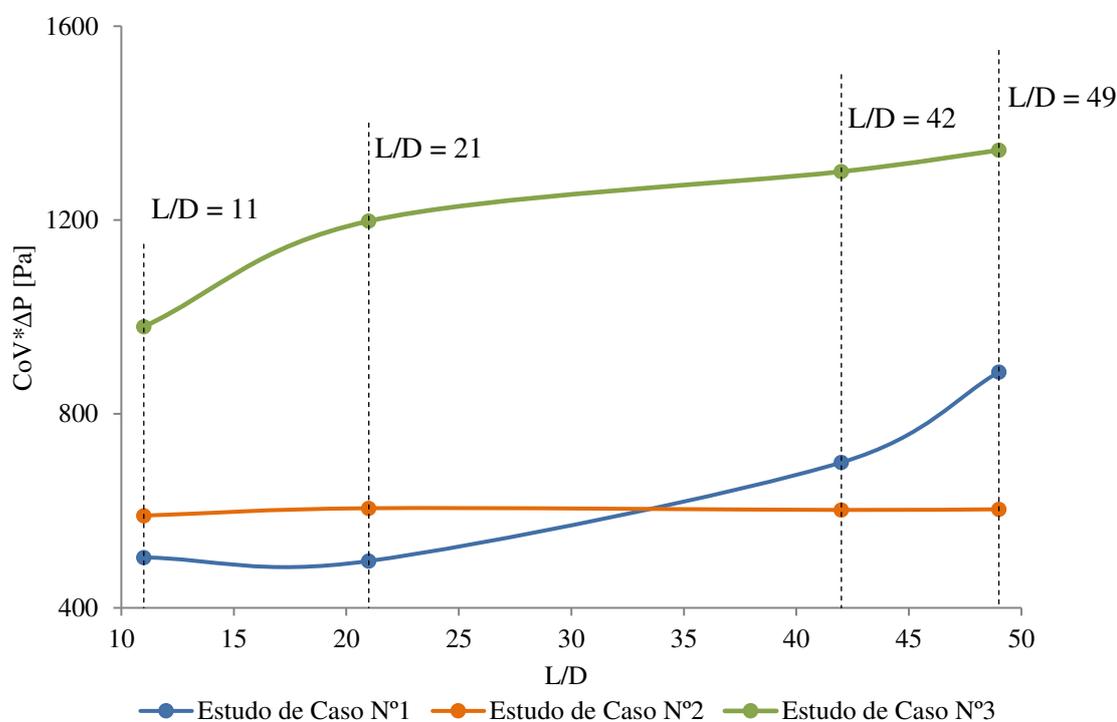


Figura 4. 8 – Parâmetro ($CoV*\Delta P$) para o misturador estático helicoidal com L/D = 42.

Os estudos de Caso N°1 e N°2 são representados pelas linhas azul e laranja. Os resultados se encontram próximos devido que o CoV obtido nos dois casos apresenta valores similares. O comportamento apresentado pelas linhas nos estudos de Caso N°1 e N°2 é devido à diferença nas quedas de pressão, sendo maior no Caso N°1. Portanto, para $L/D = 49$ o misturador estático helicoidal apresenta um melhor rendimento nas condições do estudo de Caso N°2.

4.5 Mistura de hidrocarbonetos.

As propriedades de alta viscosidade e densidade dos óleos pesados fazem com que estes fluidos requeiram tratamentos específicos para o seu transporte. A diluição é uma das técnicas mais utilizadas para transportar óleos pesados, a qual envolve a mistura do óleo pesado com um hidrocarboneto leve ou derivados do petróleo. O comportamento da mistura do óleo pesado com um hidrocarboneto leve em um misturador estático helicoidal foi estudado no presente trabalho. Os resultados demonstraram que o misturador estático no processo de diluição poderia ser uma excelente opção para promover a mistura destes fluidos antes do transporte do óleo pesado. Os hidrocarbonetos utilizados no presente trabalho são considerados fluidos newtonianos, por tanto o modelo 3D para o estudo de Caso N°4 é similar ao modelo de simulação proposto para o estudo de Caso N°1 (analisado na secção anterior).

A Figura 4.9 apresenta os valores de CoV para o misturador estático até $L/D = 49$. Em $L/D = 11$ (3 elementos de mistura) se tem um valor alto de $CoV = 0,482$ que representa um grau de homogeneização baixa. O aumento do número de elementos de mistura permite obter uma melhor qualidade de mistura, atingindo um CoV menor ao valor aceito na indústria (5%) (linha vermelha).

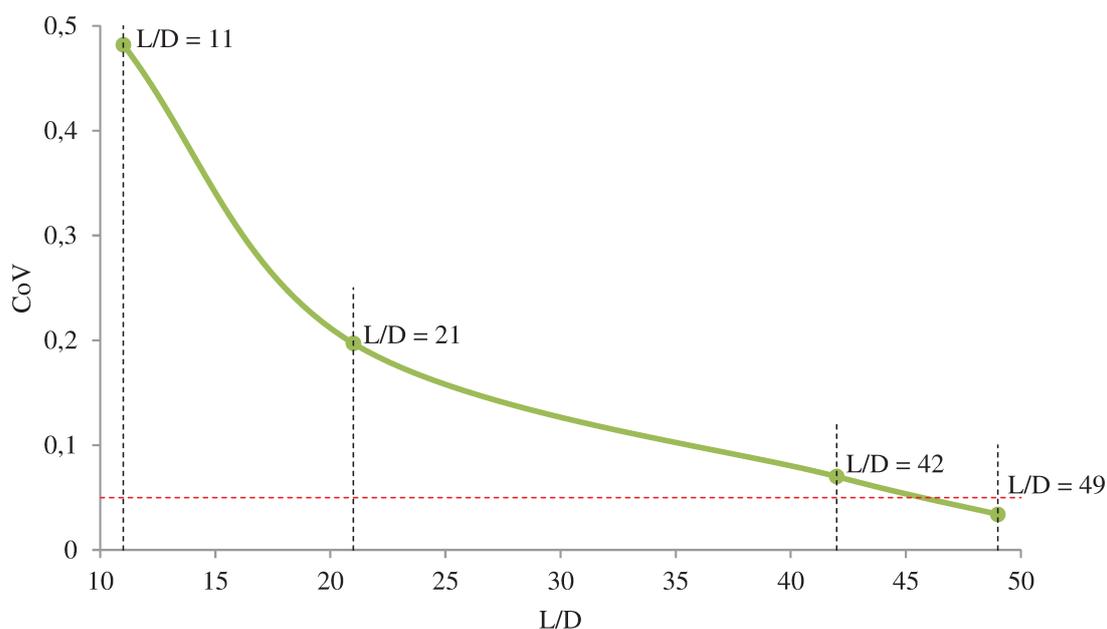


Figura 4. 9 – CoV para a mistura de óleo pesado com óleo leve (L/D = 49).

Os perfis transversais de concentração são apresentados na Figura 4.10. Esses perfis transversais mostram o progresso da mistura ao longo do misturador. As concentrações do óleo leve foram analisadas para L/D = 21, L/D = 42 e L/D = 49, que correspondem a 6, 12 e 14 elementos de mistura.

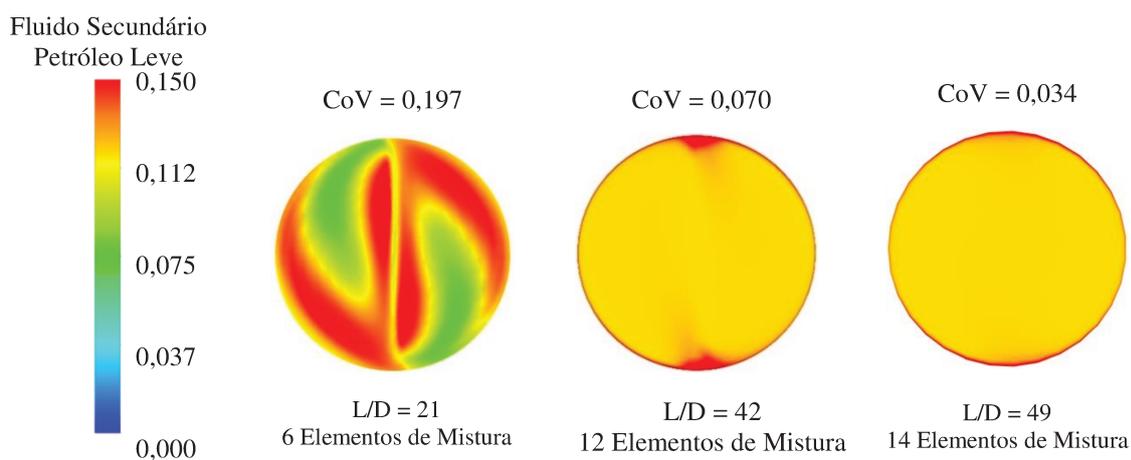


Figura 4. 10 – Perfis transversais de concentração para L/D = 21, L/D = 42 e L/D = 47 (Mistura de óleo pesado com óleo leve).

Em $L/D = 21$, se tem um baixo número de estrias, as quais demonstram um baixo grau de mistura. Na medida que os elementos de mistura aumentam, o número de estrias aumenta, permitindo uma melhor qualidade de mistura. Como se pode observar nos perfis em $L/D = 42$ e $L/D = 49$, o perfil transversal apresenta cor amarelo na maior parte do perfil, mostrando um grau de homogeneização alto na mistura de óleo pesado e óleo leve.

Com o aumento dos elementos de mistura, a queda de pressão também aumenta. Considerando que a viscosidade do fluido utilizado nesta parte do projeto é muito maior do que nos casos estudados anteriormente, a queda de pressão aumenta consideravelmente. A Tabela 4.8 apresenta os resultados da queda de pressão para a mistura dos hidrocarbonetos no misturador estático. Os resultados mostram que a queda de pressão aumenta mais do dobro comparado com o modelo de simulação 3D que foi considerado como referência. Este resultado era esperado, visto que o consumo energético de transporte em um misturador estático é diretamente proporcional à viscosidade.

Tabela 4. 8 – Queda de pressão no misturador estático com $L/D = 47$ (Fluidos hidrocarbonetos).

Estudos de Caso	ΔP Tubo vazio [Pa]	ΔP [Pa]	K_L Calculado	K_L Literatura (ETCHELLS III & MEYER, 2004)
Nº 1	1.680,0	11.420,0	6,8	6,9
Fluidos Hidrocarbonetos	3.558,0	24.120,0	6,78	6,9

5.2 Campo de velocidade

O comportamento da velocidade no misturador estático helicoidal foi estudado para a mistura de óleo pesado com o óleo leve. Na Figura 4.11 observa-se a distribuição de velocidades através do misturador estático. A cor vermelha corresponde à máxima velocidade e a cor azul representa a mínima velocidade dos fluidos. A diferença de velocidade entre os pontos de maior velocidade nos espaços dentro do misturador estático e os pontos de menor

velocidade nas paredes do equipamento permitem a homogeneização dos fluidos. Essa diferença de velocidades e o contato dos fluidos com os elementos de mistura (onde a velocidade é nula) geram estrias e promovem a mistura. O perfil de velocidade é similar para todos os estudos de caso propostos, considerando que os pontos de máxima velocidade e mínima velocidade são iguais para qualquer fluido misturado neste equipamento.

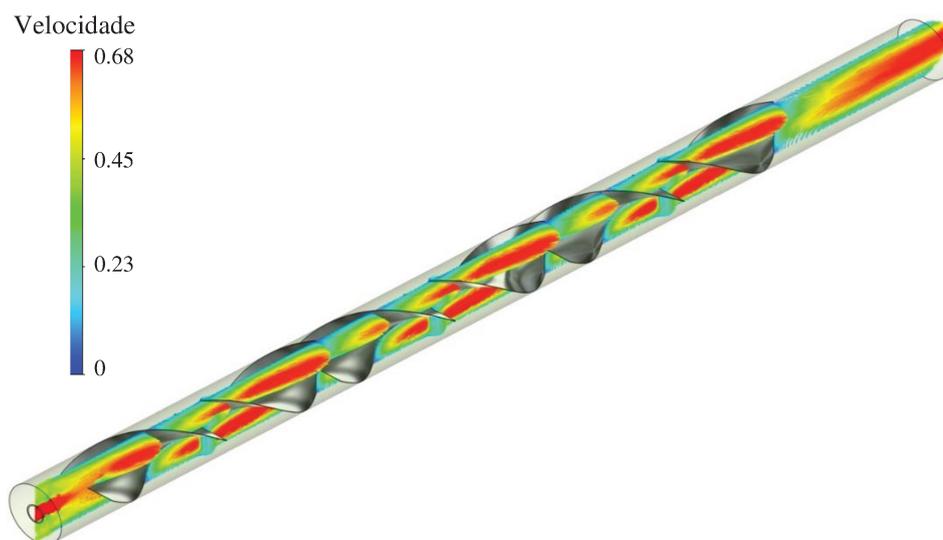


Figura 4. 11 – Perfil longitudinal de velocidade para $L/D = 21$.

Os perfis transversais de velocidade através do misturador estático com $L/D = 0$ e $L/D = 21$ são apresentados na Figura 4.12. Na Figura 4.12(a) é possível observar a velocidade na entrada do misturador estático. As velocidades de entrada para os fluidos são diferentes e constantes. Neste caso, a cor vermelha representa o fluido secundário com maior velocidade $V=0,689$ [m/s] e a cor verde representa o fluido primário com menor velocidade $V=0,389$ [m/s]. A Figura 4.12(b) apresenta o perfil transversal de velocidade dentro do misturador estático. A velocidade maior é representada com a cor vermelha e está presente nos espaços vazios dentro do equipamento. A menor velocidade é representada pela cor azul e é observada nas paredes dos elementos de mistura e nas paredes da tubulação. A velocidade dentro do misturador estático varia entre 0 [m/s] e 0,68 [m/s]. É essa diferença nas velocidades promove a formação das estrias e auxilia no processo de mistura.

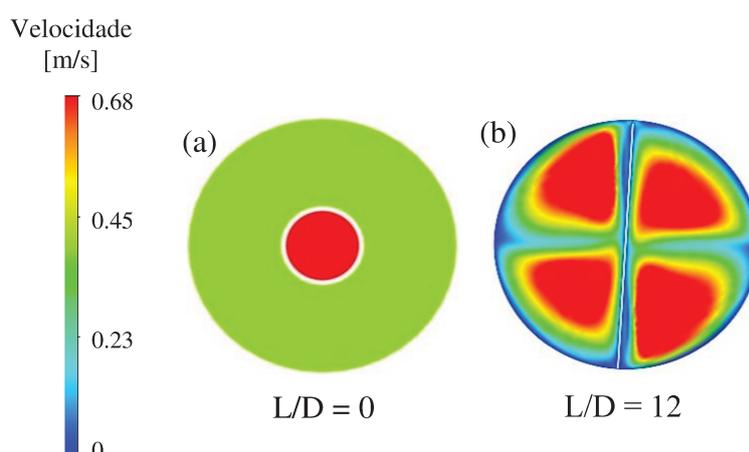


Figura 4. 12 – Perfis transversais de velocidade para o estudo de caso N°1

5.3 Influência da Geometria

A geometria do misturador estático é um aspecto importante para a seleção do equipamento. A partir da geometria se determinam os tipos de fluidos que podem ser misturados, o regime de fluxo e a queda de pressão do equipamento. A forma, distribuição, número e tamanho dos elementos de mistura permitem analisar dois parâmetros importantes em misturadores estáticos: a queda de pressão e a qualidade da mistura. Para o caso do misturador estático helicoidal a rotação dos elementos, seja da direita para a esquerda ou vice-versa, influi consideravelmente no CoV final. A Figura 4.13 apresenta duas configurações geométricas com rotação diferente para os elementos de mistura, analisadas na mistura de óleo pesado e óleo leve até $L/D = 21$ (6 elementos de mistura). A Figura 4.13a mostra o sentido de rotação de esquerda para a direita para todos os elementos do misturador estático. Embora cada elemento exiba uma posição diferente (rotação 90°) em relação ao elemento vizinho de cada lado, o sentido do fluxo em cada elemento de mistura é igual. A qualidade da mistura para este caso é menor que para o caso do sentido de fluxo intercalado (Figura 4.13b). O misturador estático helicoidal com sentido de rotação intercalado é apresentado na Figura 4.13b. Os elementos de mistura estão localizados de tal forma que o fluxo mantém um padrão de direita-esquerda e esquerda-direita durante o percurso no misturador. A posição dos elementos de mistura nesta configuração também mostra rotação de 90° em relação aos elementos vizinhos. A qualidade da mistura para esta configuração intercalada é consideravelmente maior.

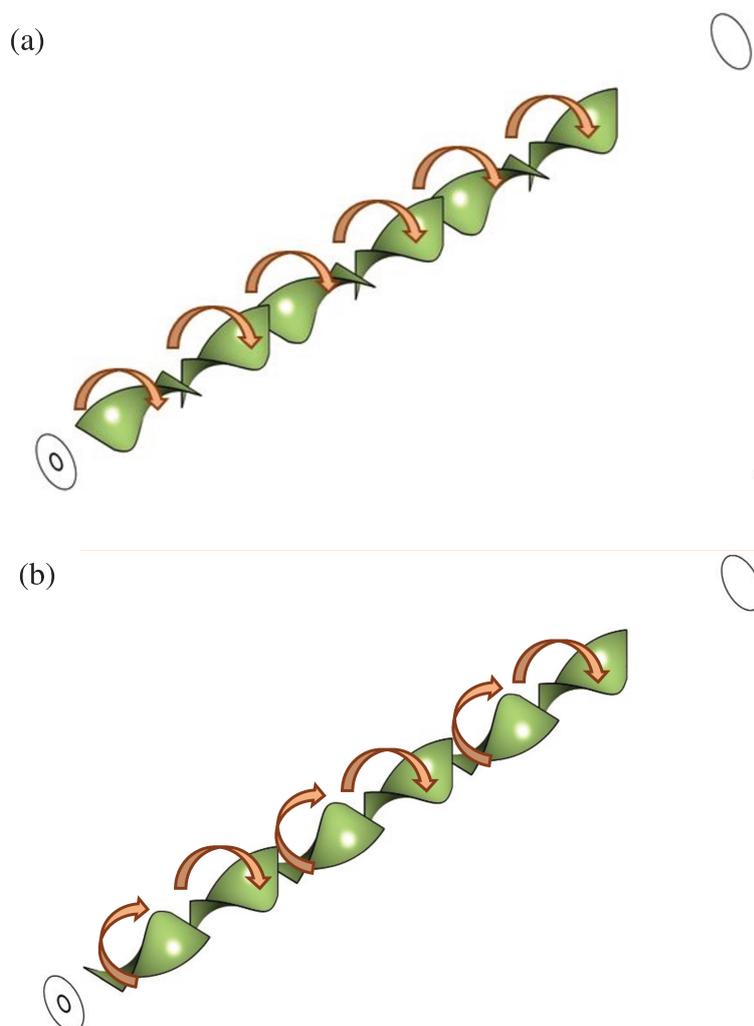


Figura 4. 13 – Configuração geométrica com diferenças na rotação dos elementos estáticos para o estudo de Caso N°1 ($L/D = 21$). (a) Padrão esquerda-direita. (b) Padrão direita-esquerda, esquerda-direita.

As Figuras 4.14 e 4.15 mostram os perfis de concentração na saída (Figuras 4.14a, 4.14b e 4.15a, 4.15b) para a mistura de óleo pesado e óleo leve, e a mistura de Glicerol, respectivamente. Estes perfis foram obtidos a partir da mistura nas geometrias propostas na Figura 4.13. A concentração do fluido secundário apresentada por cada configuração geométrica mostra diferenças consideráveis. A geometria da Figura 4.13a (padrão esquerda-direita) correspondente ao perfil mostrado na Figura 4.14a e 4.15a, apresentou um valor do CoV de 0,244 e 0,284, respectivamente. Para a geometria da Figura 4.13b o perfil de concentração é mostrado na Figura 4.14b e 4.15b, a qual apresentou um valor de CoV de

0,197 e 0,156, respectivamente. Portanto a configuração com padrão de fluxo de esquerda-direita para todos os elementos de mistura promove uma relativa baixa homogeneização dos fluidos. Por conseguinte, o padrão intercalado (direita-esquerda e esquerda-direita) (Figura 4.13b) no misturador estático promove a mistura, obtendo graus de homogeneização maiores, em relação ao padrão apresentado na Figura 4.13a.

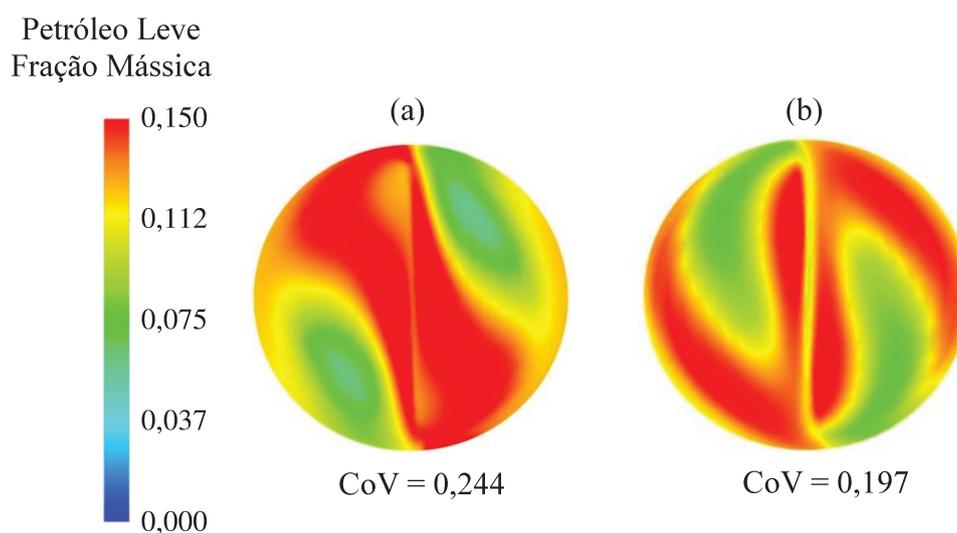


Figura 4. 14 – Perfis de concentração para configurações geométricas com diferenças na rotação dos elementos estáticos para o estudo de Caso N°4. (a) Padrão esquerda-direita. (b) Padrão direita-esquerda, esquerda-direita.

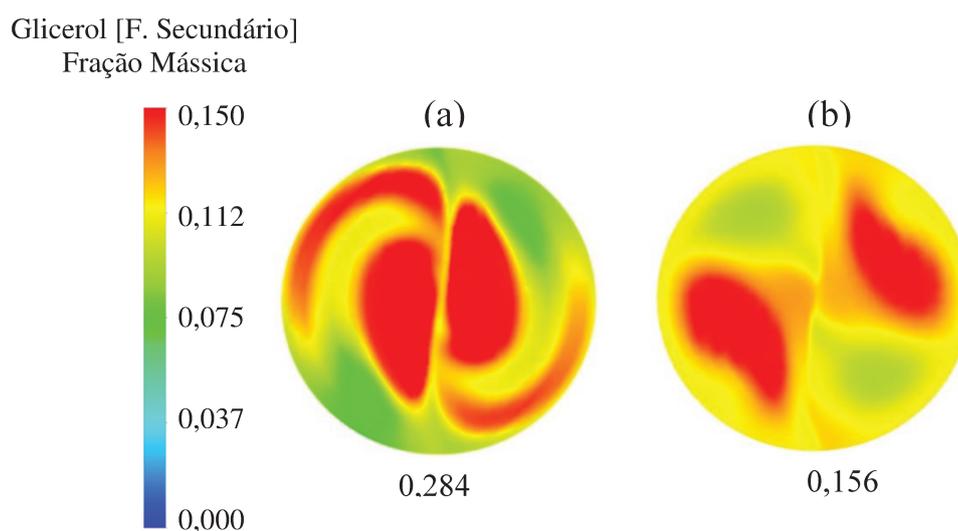


Figura 4. 15 – Perfis de concentração para configurações geométricas com diferenças na rotação dos elementos estáticos para o estudo de Caso N°1. (a) Padrão esquerda-direita. (b) Padrão direita-esquerda, esquerda-direita.

A queda de pressão é uma das variáveis mais importantes no projeto e fabricação de misturadores estáticos. A Tabela 4.9 mostra os resultados da pressão para as configurações propostas na Figura 4.13. A Tabela 4.9 apresenta os valores de pressão em $L/D = 0$, $L/D = 6$, $L/D = 12$ e $L/D = 21$. Os valores de pressão em $L/D = 0$ variam para as duas configurações entre 4350,20 [Pa] e 4696,77 [Pa], sendo (a) padrão esquerda-direita e (b) Padrão direita-esquerda, esquerda-direita. Em $L/D = 6$ apresenta uma variação menor entre 2242,15 [Pa] e 2358,50 [Pa]. Em $L/D = 12$ e $L/D = 21$ a pressão para as configurações geométricas estudadas apresenta valores próximos. Como pode ser observado, a mudança no sentido de rotação da geometria estudada não proporciona mudanças na queda de pressão do equipamento. Isto se deve ao fato que o número de elementos de mistura é igual nos dois casos analisados e os fluidos de trabalho apresentam as mesmas propriedades físicas.

Tabela 4. 9 – Pressão para as configurações geométricas com diferenças na rotação dos elementos estáticos para o estudo de Caso N°1. (a) Padrão esquerda-direita. (b) Padrão direita-esquerda, esquerda-direita.

L/D	Pressão [Pa]	
	(a)	(b)
0	4350,20	4696,77
6	2242,15	2358,50
12	975,14	980,32
21	126,20	128,77

Considerando os resultados obtidos a partir das duas configurações geométricas, a configuração escolhida para a realização de todas as simulações do presente trabalho foi apresentada na Figura 4.12b (padrão intercalado). Como se observou na análise da presente sessão a diferença na rotação da geometria influi consideravelmente somente nos resultados do CoV. Isto é porque a rotação dos elementos de mistura promove um padrão de fluxo diferente. Variáveis como a velocidade e a pressão não apresentam diferenças devido a que o número de elementos dentro do misturador estático e os fluidos de trabalho não variam.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalhos futuros.

Nesta sessão são apresentadas as principais conclusões do presente trabalho, além de sugestões de possíveis trabalhos futuros que podem ser realizados a partir dos resultados aqui mostrados.

5.1 Conclusões

- O objetivo principal do trabalho foi o estudo da mistura de Glicerol 80% p/p, mistura de óleo pesado e óleo leve, mistura de Carbopol 940 0,1% p/p, mistura de Carbopol 940 0,1% e Carbopol 940 0,2% p/p a partir do desenvolvimento de um modelo tridimensional. O modelo computacional foi gerado considerando dados experimentais encontrado em Alberini F. et al., (2013). A validação do modelo computacional foi realizada para o estudo de Caso N°1, da mistura de Glicerol. Os resultados experimentais e de simulação para o coeficiente de variação CoV apresentam diferenças de 1,92% para o misturador estático com 6 elementos e de 2,24% para o misturador estático com 12 elementos de mistura. O modelo também foi validado comparando os resultados do fator K_L que relaciona a queda de pressão no tubo sem misturador estático e a queda de pressão no misturador estático. No estudo de Caso N°1 a diferença dos resultados de simulação com os resultados experimentais em relação ao fator K_L é de 1,49% para 12 elementos de mistura ($L/D = 42$). Portanto, os resultados obtidos a partir das simulações demonstraram que o modelo computacional proposto representa de forma adequada o fenômeno estudado.

- Com o intuito de atingir o valor de CoV requerido na indústria, foi necessário fazer simulações com até 16 elementos de mistura. Nos estudos de Caso N°1 (Glicerol), N°2 (Carbopol 940 0,2% p/p) e N°4 (óleo pesado e óleo leve) a mistura alcançou um valor $\leq 0,05$ com 14 elementos de mistura ($L/D = 49$). Sendo $CoV = 0,043$ para o estudo de Caso N°1, $CoV = 0,045$ para o estudo de Caso N°2 e $CoV = 0,034$ para o estudo de Caso N°4. As simulações realizadas para o estudo de Caso N°4, as quais utilizaram fluidos hidrocarbonetos, demonstraram que o modelo 3D proposto é adequado para o processo de diluição de óleo pesado. Para o estudo de Caso N°3 (Carbopol 940 0,2% e 0,1%) foram necessários 16 elementos de mistura para chegar ao valor de $CoV = 0,048$. Os fluidos de trabalho no estudo de Caso N°3 apresentam diferenças de viscosidade que dificultam a mistura. Portanto é necessário maior número de elementos de mistura com o intuito de intensificar o momento e aumentar a transferência de massa, conseguindo assim um CoV ótimo.
- O fator K_L foi calculado para os estudos de Caso propostos até $L/D = 49$. As diferenças entre o valor de K_L calculado e o valor de $K_L = 6,9$ estabelecido na literatura (Etchells III et al., (2004)) são de 2,32% para a mistura do estudo de Caso N°1 (Glicerol) e de 1,74% para a mistura do estudo de Caso N°4 (óleo pesado e óleo leve). Essas diferenças apresentadas nestes casos são atribuídas a fatores geométricos, pois a geometria utilizada no presente trabalho foi construída a partir de informações encontradas em Alberini F. et al., (2013) e algumas condições assumidas. Para as misturas dos estudos de Caso N°2 (Carbopol 940 0,1% p/p) e N°3 (Carbopol 940 0,1% p/p e Carbopol 940 0,2% p/p) as diferenças entre o valor calculado de K_L e o valor da literatura, são altas, em torno de 25%. Isso é devido a que os fluidos utilizados são não newtonianos, para os quais é necessário outro tipo de aproximações.
- A variação no sentido de rotação dos elementos de mistura permitiu analisar as diferenças na resposta da eficiência de mistura. Para as duas configurações geométricas propostas (padrão esquerda-direita e padrão intercalado (esquerda-direita, direita-esquerda)) foram observados os escoamentos e ocorreram mudanças no padrão de fluxo. Essa mudança no padrão de fluxo deu origem a uma melhor qualidade de mistura no caso do padrão intercalado, sendo esta a configuração geométrica utilizada em todas as simulações realizadas neste trabalho. A análise foi realizada para a mistura de óleo pesado e óleo leve (Estudo de Caso N°4) com 6 elementos de mistura,

para a qual se encontrou um valor de $CoV = 0,244$ para o padrão esquerda-direita e um $CoV = 0,197$ para o padrão intercalado. Também foi realizada uma simulação para a mistura de Glicerol tendo como resultado um $CoV = 0,284$ para o padrão esquerda-direita e um $CoV = 0,156$ para o padrão intercalado.

5.2 Trabalhos futuros

- A geometria é um parâmetro importante no projeto e fabricação de misturadores estáticos, a qual afeta diretamente as variáveis de maior relevância: eficiência de mistura e queda de pressão. Portanto, as pesquisas em relação à variação deste parâmetro são necessárias. No presente trabalho foi estudado o comportamento da mistura dos diferentes fluidos utilizados no misturador estático com um diâmetro constante e comprimento constante dos elementos de mistura e da tubulação. Aumentar o diâmetro dos elementos de mistura e da tubulação, aumentar ou diminuir o comprimento dos elementos de mistura, definir uma rotação diferente, são características que poderiam ser variadas na geometria com o intuito de atingir valores de $CoV \leq 0,05$ com menores perdas de carga.
- A queda de pressão depende do número de elementos de mistura dentro do misturador estático. Sendo assim, a qualidade de mistura desejada e o consumo energético sempre devem ser observados em conjunto para que uma ótima geometria seja escolhida. Portanto, o coeficiente de variação CoV poderia ser estudado considerando uma nova geometria com maior diâmetro interno da tubulação e dos elementos de mistura com o intuito de diminuir o número de elementos de mistura e desta forma gerar um gasto menor de energia.
- No presente trabalho os fluidos foram injetados de forma concêntrica. A geração de uma pré-mistura a partir de uma configuração diferente da entrada dos fluidos no misturador estático poderia melhorar a homogeneização dos fluidos. Portanto o número de elementos necessários para atingir o grau de homogeneização requerido seria menor.

- As simulações foram realizadas em regime de fluxo laminar, com Número de Reynolds (Re) entre 88 e 91. Sugere-se a simulação da geometria proposta para regime de fluxo turbulento com o intuito de caracterizar o comportamento dos fluidos e comparar resultados com os encontrados para o regime laminar.

Bibliografia

ALBERINI F., SIMMONS M. J. H., INGRAM A., E. H. S.. Use of an Areal Distribution of Mixing Intensity to Describe Blending of Non-Newtonian Fluids in a Kenics KM Static Mixer Using PLIF. *AICHE Journal*, 60, (2013).

CHARLOS, J.C; COURDEC, J.L; PAGE J.F. Heavy oil processing, a synthesis of the ASVAHL results. In E.C. 3rd European community symposium on new technologies for the exploration and exploitation of oil and gas resources, Proceeding, 1988, Luxembourg. v. 2, p. 22-24.

CHEMINEER. Reliability & Technology in Mixing. 2015. Retrieved June 12, 2017, from <http://www.chemineer.com/products/kenics/km-mixers.html>

CHHABRA, R. P., RICHARDSON, J. F. *Non-Newtonian Flow and Applied Rheology*. Oxford. 2008.

COKER, A. K. Mixing of Liquids. Ludwig's Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants, v. 1, p. 445–523, 2007.

CORONEO, M., MONTANTE, G., PAGLIANTI, A. Computational fluid dynamics modeling of corrugated static mixers for turbulent applications. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 51, n.49, p.15986–15996, 2012.

COUPER, J. R., PENNY, W. R., FAIR, J. R., WALAS, S. M. *Mixing and Agitation. Chemical Process Equipment. Third Edition*, p. 277–327, 2012.

DAVUDOV D., GHANBARNEZHAD M. G. A systematic comparison of various upgrading techniques for heavy oil. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v.156, p.623-632, 2017.

ESSS. FLUIDODINÁMICA COMPUTACIONAL. 2016. Retrieved July 17, 2016, from <http://www.esss.com.br/blog/es/2016/06/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/>

ETCHELLS III, A. W., MEYER, C. F. Mixing in pipelines. (E. L. Paul, V. A. Atiemo-Obeng, & S. M. Kresta, Eds.). Wiley: *Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice*. 2004.

FOURCADE, E., WADLEY, R., HOEFSLOOT, H. C. J., GREEN, A., IEDEMA, P. D. CFD calculation of laminar striation thinning in static mixer reactors. *Chemical Engineering Science*, v.56, p.6729–6741, 2001.

GALAKTIONOV, O. S., ANDERSON, P. D., PETERS, G. W. M., MEIJER, H. E. H. Morphology Development in Kenics Static Mixers (Application of the Extended Mapping Method). *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v.80, p. 604–613, 2002.

GHANEM, A., LEMENAND, T., DELLA VALLE, D., PEERHOSSAINI, H. Static mixers: Mechanisms, applications, and characterization methods - A review. *Chemical Engineering Research and Design*, v.92, n.2, p. 205–228, 2014.

GYENIS, J. Static Mixer - Montionless Mixer, Freising, Germany, 2007.

JAFFER, S. A., & WOOD, P. E. Quantification of Laminar Mixing in the Kenics Static Mixer: An Experimental Study. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v.76, 1998.

JEGATHEESWARAN, S., EIN-MOZAFFARI, F., WU, J. Efficient mixing of yield-pseudoplastic fluids at low Reynolds numbers in the chaotic SMX static mixer. *Chemical Engineering Journal*, v.317, p. 215–231, 2017.

JONES, S. C., SOTIROPOULOS, F., AMIRTHARAJAH, A. Numerical Modeling of Helical Static Mixers for Water Treatment. *Journal of Environmental Engineering*, v.128, p.431–440, 2002.

JOVANOVIĆ, A., PEZO, M., PEZO, L., LEVIĆ, L. DEM/CFD analysis of granular flow in static mixers. *Powder Technology*, v.266, p.240–248, 2014.

JR., C. F. JOAQUIM, REYNOLDS, A., CEKINSKI, E., SECKLER, M. M., NUNHEZ, J. R. Development of static mixers for miscible fluids in laminar flow with the use of computational fluid dynamics (CFD), *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v.89, 2011.

KHAPRE, A., & MUNSHI, B. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers Numerical investigation of hydrodynamic behavior of shear thinning fluids in stirred tank. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, v.56, p.16–27, 2015.

KHAPRE, A., & MUNSHI, B. Data in Brief Data on the mixing of non-Newtonian fluids by a Rushton turbine in a cylindrical tank. *Data in Brief*, v.8, p.1416–1420, 2016.

KRSTIC, D. M., WILHELM, H., KORIS, A. K., VATAI, G. N. Energy-saving potential of cross-flow ultrafiltration with inserted static mixer : Application to an oil-in-water emulsion. *Separation and Purification Technology*, v.57, p.134–139, 2007.

LOBRY, E., THERON, F., GOURDON, C., LE, N., XUERE, C., LASUYE, T. Turbulent liquid – liquid dispersion in SMV static mixer at high dispersed phase concentration. *Chemical Engineering Science*, v.66, p.5762–5774, 2011.

MALISKA, C. R. *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*. LTC Editora, Rio de Janeiro, 1995.

MARTÍNEZ – PALOU Rafael, *et. al.* Transportation of heavy and extra – heavy crude oil by pipeline: A review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v.75,2011.

MEIJER, H. E. H., SINGH, M. K., & ANDERSON, P. D. On the performance of static mixers: A quantitative comparison. *Progress in Polymer Science*, v.37, n.10, p.1333–1349, 2012.

MONTANTE, G., CORONEO, M., & PAGLIANTI, A. Blending of miscible liquids with different densities and viscosities in static mixers. *Chemical Engineering Science*, v.141, p.250–260, 2016.

MYERS K.J., BAKKER, A., & RYAN, D. Avoid Agitation By Selecting Static Mixers, v.93, p.28–38,1997.

RAMSAY, J., SIMMONS, M. J. H., INGRAM, A., STITT, E. H., MATTHEY, J., & CENTRE, T. Mixing performance of viscoelastic fluids in a Kenics KM in-line static mixer. *Chemical Engineering Research and Design*, p.1–15, 2016.

RANADE, V. V. Computational flow modeling for chemical reactor engineering. India. 2002.

RAULINE, D., TANGUY, P. A., BLÉVEC, J.-M. LE, & BOUSQUET, J. Numerical Investigation of the Performance of Several Static Mixers. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v.76, p.527–535, 1998.

REGNER, M., ÖSTERGREN, K., & TRÄGÅRDH, C. Effects of geometry and flow rate on secondary flow and the mixing process in static mixers-a numerical study. *Chemical Engineering Science*, v.61, n.18, p.6133–6141, 2006.

ROSS, 2015. Retrieved June 12, 2017, from <http://www.mixers.com/products/lpd-llpd-motionless-mixer/>

SANIERE A, HÉNAUT I., ARGILLIER J.F. Pipeline transportation of heavy oils, a strategic, economic and technological challenge. *Oil & gas science and technology*, v.59, 2004.

SANTOS R. G., LOH W., BANNWART A. C., TREVISAN O. V. an overview of heavy oil properties and its recovery and transportation methods. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v.31, p.571-590, 2013.

SARDIK MIXERS. 2010. Retrieved June 12, 2017, from <http://www.sardikmixers.com/page/pro/137.php>

SHADI W. H. MAMDOUH T. G., NABIL E. Heavy crude oil viscosity reduction and rheology for pipeline transportation. *Fuel*. 2009. Vol 89.

SONG, H., & HAN, S. P. A general correlation for pressure drop in a Kenics static mixer. *Chemical Engineering Science*, v.60, p.5696–5704, 2005.

STREIFF, F. A., JAFFER, S., & SCHNEIDER, G. Design and application of motionless mixer technology. Proc. ISMIP3, p.107–114, 1999.

SULZER. 2006. Retrieved June 12, 2017, from http://www.sulzer.com/ro/-/media/Documents/ProductsAndServices/Mixpac_Cartridges_Applications_Static_Mixers/Static_Mixers/Brochures/Mixing_and_Reaction_Technology_e_23270640.pdf

THAKUR, R. K., VIAL, C., NIGAM, K. D. P., NAUMAN, E. B., & DJELVEH, G. Static Mixers in the Process Industries – a Review. Trans IChemE, v.81, 2003.

WAGENINGEN, W. F. C. VAN, KANDHAI, D., MUDDE, R. F., & AKKER, H. E. A. VAN DEN. Dynamic Flow in a Kenics Static Mixer: An Assessment of Various CFD Methods. AIChE Journal, v.50, n.8, p.1684–1696, 2004.

ZADYMOVA N. M., SKVORTSOVA Z. N., TRASKINE V. T., KULIKOV-KOSTYUSHKO F. A., KULICHIKHIN V. G., MALKIN A. Y. Rheological properties of heavy oil emulsions with different morphologies. Journal of Petroleum Science and Engineering, p.522 – 530, 2017.

ZHANG J., CHEN X., ZHANG D., XU J., Rheological behavior and viscosity reduction of heavy crude oil and its blends from the Sui-Zhong oilfield in China. Journal of Petroleum Science and Engineering, v.156, p.563–574, 2017.

ZHU L., WANG Y., WANG S., HUO T., JING X., LI A. High viscosity-reducing performance oil-soluble viscosity reduction agents containing acrylic acid ester as monomer for heavy oil with high asphaltene content. Journal of Petroleum Science and Engineering, v.163, p.37 – 44, 2018.