

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

DISSERTAÇÃO

**AVALIAÇÃO DA DISSOLUÇÃO DE PARTÍCULAS DE HALITA EM SALMOURAS
NO ESCOAMENTO ASCENDENTE EM TUBO**

RODOLFO MAURICIO ALVAREZ VELASCO

2018



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**AVALIAÇÃO DA DISSOLUÇÃO DE PARTÍCULAS DE HALITA EM SALMOURAS
NO ESCOAMENTO ASCENDENTE EM TUBO**

RODOLFO MAURICIO ALVAREZ VELASCO

Sob a Orientação da Professora

Cláudia Míriam Scheid

e Co-orientação do Professor

Luís Américo Calçada

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Química**, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Área de Concentração em Tecnologia Química.

Seropédica, RJ
Novembro de 2018

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

V433a Velasco, Rodolfo Mauricio Alvarez, 1989-
Avaliação da dissolução de partículas de halita em
salmouras no escoamento ascendente em tubo / Rodolfo
Mauricio Alvarez Velasco. - 2018.
100 f.: il.

Orientadora: Claudia Miriam Scheid.
Coorientador: Luis Américo Calçada.
Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, Pós graduação em engenharia
química, 2018.

1. Fluidos de perfuração. 2. Pré-sal. 3.
Transferência de massa. 4. Dissolução de sais. I.
Scheid, Claudia Miriam, 1968-, orient. II. Calçada,
Luis Américo, 1966-, coorient. III Universidade
Federal Rural do Rio de Janeiro. Pós graduação em
engenharia química. IV. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

RODOLFO MAURICIO ALVAREZ VELASCO

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Química**, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, área de Concentração em Tecnologia Química.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 23/ 11/ 2018

Cláudia Míriam Scheid, D.Sc., DEQ/IT/UFRRJ

(Orientadora)

Luiz Augusto da Cruz Meleiro, D.Sc., DEQ/IT/UFRRJ

Alexandre Rodrigues Torres, D.Sc., DEQA/FAT/UERJ

Dedico este trabalho à minha mãe Elvira, minha família, minha namorada Silvane e aos seres de luz que já não estão mais presentes e que continuam guiando o meu caminho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por ter me guiado até este momento, me protegendo no caminho e ajudando a cumprir meus objetivos.

Agradeço à minha mãe Elvira pelo amor, amizade e apoio incondicional em todos os momentos da minha vida. Sempre levo seus ensinamentos na minha vida e espero ser um profissional e pessoa exemplar como minha mãe. Tudo o que sou devo a você, te amo mãe.

Agradeço à minha tia Beatriz que me apoiou à distância e sempre se preocupou comigo e aos demais tios, tias e primos pelo apoio e amor, suas palavras de ânimo me ajudaram a continuar meu caminho.

Agradeço à minha namorada, Anne, por estar sempre ao meu lado, sem seu apoio não teria conseguido realizar este trabalho. Obrigado por fazer meus dias mais felizes e por ser a companheira perfeita, te amo muito.

Agradeço à Universidade Federal Rural de Rio de Janeiro por ter me permitido estudar no programa e à PETROBRAS, pelo apoio financeiro ao projeto.

Agradeço à minha orientadora, professora Claudia Miriam Scheid e ao meu coorientador, professor Luís Américo Calçada, que me abriram as portas da universidade e do LEF, pela confiança, orientação, suporte e ajuda na realização deste trabalho e pelo conhecimento compartilhado. A Eduardo e ao Sr. Elias pela ajuda constante, conhecimento inculcado e a amizade sincera que me deram, sem vocês a realização deste trabalho não teria sido possível. A todo o pessoal do LEF pela amizade, sempre levarei o aprendido e vivido no laboratório no meu coração.

Agradeço aos professores Luiz Augusto Meleiro e Alexandre Torres por terem sido parte da banca examinadora de defesa do mestrado, aos professores Hélio Junior e Roberta Mendonça por terem sido parte da banca de seminários, que contribuíram com a melhora deste trabalho. A todos os professores que ministraram as disciplinas durante o programa, agradeço pelo conhecimento adquirido.

Agradeço aos estagiários Neilton Junior e Lucas Rissi por sua vital contribuição na montagem da unidade experimental e na realização dos experimentos, sem vocês este trabalho não seria possível. Aos amigos que fiz nesta etapa, em especial ao 335, minha família no Brasil.

RESUMO

VELASCO, Rodolfo Mauricio Alvarez. **Avaliação da dissolução de partículas de halita em salmouras no escoamento ascendente em tubo**. 2018. 100 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química, Tecnologia Química). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2018.

Com a confirmação da existência de grandes reservatórios de petróleo encontrados na região do pré-sal, pesquisas estão sendo desenvolvidas com a finalidade de superar certos desafios e limitações técnicas, principalmente quando as camadas salinas são perfuradas. Um destes desafios é garantir a estabilidade nas operações de perfuração, para isso deve-se realizar um adequado controle dos fluidos de perfuração, uma vez que cascalhos de sal podem se dissolver no fluido de perfuração, modificando, assim, suas propriedades fisicoquímicas e reológicas. Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho foi estudar a dissolução de partículas de halita (NaCl) em salmouras no escoamento em tubo. Para realizar o estudo foi projetada e construída uma unidade experimental operando em condições semelhantes às da perfuração de poços de petróleo, quais sejam, número de Reynolds semelhante, escoamento vertical ascendente do fluido, movimentação das partículas sólidas juntamente com o fluido. Foi proposto um modelo matemático baseado em um sistema de equações diferenciais parciais, que se baseia na conservação de massa para as fases sólida e líquida. Para a solução do sistema foram utilizadas duas abordagens, a primeira considerando a variação do diâmetro das partículas de NaCl ao longo do escoamento e a segunda abordagem considerando o diâmetro das partículas constante. O coeficiente de transferência de massa foi estimado utilizando-se o programa computacional MAXIMA, escrito em linguagem FORTRAN, onde os perfis de concentração experimentais foram utilizados como dados de entrada. Os resultados obtidos pela simulação foram comparados com os resultados experimentais, onde o desvio relativo médio de ambas abordagens foi inferior a 5% e os coeficientes de transferência de massa se encontram na mesma ordem de grandeza que os encontrados na literatura.

Palavras – chave: Pré-sal, fluidos de perfuração, dissolução de sais.

ABSTRACT

VELASCO, Rodolfo Mauricio Alvarez. **Evaluation of halite dissolution particles in brines in pipe ascending flow.** 2018. 100 p. Dissertation (Master in Chemical Engineering, Chemical Technology). Institute of Technology, Department of Chemical Engineering, Federal University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2017.

With the confirmation of the existence of large oil reservoirs, found in the pre-salt region, researches are being developed with the purpose of overcoming certain challenges and technical limitations, especially when the salt layers are drilled. One of these challenges is to ensure good conditions for drilling operations. Proper drilling fluids control must be performed since salt cuttings can dissolve in the drilling fluid, thus modifying their physicochemical and rheological properties. Within this context, the objective of this work was the study of the dissolution of halite (NaCl) particles in brines in pipe flow. In order to carry out the study, it was necessary to design and built an experimental unit that operates under similar conditions to the drilling conditions of oil wells, which are similar Reynolds number, vertical upward flow of the fluid, movement of the solid particles together with the fluid. It was proposed a mathematical model based on an partial differential equations system that is based on the mass conservation for the solid and liquid phases. For the solution of the system two approaches were considered, the first considers the variation of the diameter of the NaCl particles along the flow and the second approach considers the particle diameter constant. The global mass transfer coefficient was estimated using the computational program MAXIMA, written in FORTRAN language, where the experimental concentration profiles were used as input data. The results obtained by the simulation were compared with the experimental results, where the mean relative deviation of the two approach was less than 5% and the estimated mass transfer coefficients are in the same order of magnitude as those found in the literature.

Keywords: Pre-salt, drilling fluids, salts dissolution.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema de um reservatório de petróleo	3
Figura 2 – Esquema de uma unidade de perfuração a percussão	5
Figura 3 – Esquema de uma Sonda de perfuração	6
Figura 4 – Esquema do perfil geológico do pré-sal.	7
Figura 5 – Curvas de escoamento de fluido newtoniano e fluido não-newtoniano....	20
Figura 6 – Esquema da célula de dissolução utilizada por Simon.....	22
Figura 7 – Esquema da unidade experimental utilizada por Aksel’rud <i>et al</i> (1992)...	23
Figura 8 – Esquema da unidade experimental utilizada por Darby e Forsyth.	25
Figura 9 – Esquema da unidade experimental utilizada ppr Alkattan <i>et al.</i> (1997)....	27
Figura 10 – Esquema da unidade experimental de Patrão (2012) e Martins (2014) .	30
Figura 11 – Perfis de concentração de NaCl em função da posição.....	31
Figura 12 – K em função da concentração da fase líquida.	32
Figura 13 – Fluxograma da metodologia empregada.....	35
Figura 14 – Esquema simplificado da unidade experimental de dissolução de sal. ...	36
Figura 15 – Foto da unidade experimental.....	37
Figura 16 – Tubulação de acrílico.	38
Figura 17 – a) Esquema da torre de suporte; b) Construção da torre de suporte; c) Disposição final da torre de suporte.	39
Figura 18 – a) Desenho dos tanques de armazenamento de fluido; b) Montagem dos tanques; c) Disposição final dos tanques de armazenamento de fluido.....	39
Figura 19 – Bomba posicionada na saída dos tanques de armazenamento.....	40
Figura 20 – Bomba posicionada na saída do sistema de adição de sólidos.	40
Figura 21 – Esquema simplificado do sistema de adição de sólidos.....	41
Figura 22 – Foto do sistema de adição de sólidos.	41
Figura 23 – a) Recipiente de armazenamento de sólidos; b) Quadro de comando; c) bandeja vibratória.....	42
Figura 24 – Tubulação de efeito Venturi e sistema de <i>by pass</i>	43
Figura 25 – Amostras de NaCl.	43
Figura 26 – Conjunto de peneiras e sistema vibratório.	44
Figura 27 – Foto das peneiras com amostras de sal.....	44
Figura 28 – Abastecimento de NaCl ao sistema de adição de sólidos.....	45

Figura 29 – Picnômetro utilizado para determinar a densidade do sal.....	46
Figura 30 – Esquema da unidade de bancada utilizada para a construção das curvas de calibração.....	47
Figura 31 – Unidade de bancada utilizada para a construção das curvas de calibração	47
Figura 32 – Condutivímetros Metler Toledo SevenCompact S230.....	48
Figura 33 – Eletrodo posicionado na unidade experimental.....	48
Figura 34 – Quadro dos inversores de frequência.	49
Figura 35 – a) Esquema do rotâmetro b) Foto de rotâmetro utilizado.	49
Figura 36– Curva de calibração para a determinação da concentração de NaCl a 25°C	57
Figura 37 – Distribuição granulométrica das amostras avaliadas.	58
Figura 38 – Concentração de NaCl em função da posição para a concentração inicial de 0 g/L de NaCl.	60
Figura 39 – Concentração de NaCl em função da posição para a concentração inicial de 32 g/L de NaCl.	62
Figura 40 – Concentração de NaCl em função da posição para a concentração inicial de 64 g/L de NaCl.	64
Figura 41 – Simulação e dados experimentais para a concentração de 0 g/L de NaCl.	70
Figura 42 – Validação do modelo para a concentração de 0 g/L de NaCl.	70
Figura 43 – Desvio relativo do perfil de concentração simulado quando se considera a variação do diâmetro da partícula para a concentração inicial de 0 g/L de NaCl.	71
Figura 44 – Desvio relativo do perfil de concentração simulado quando se considera o diâmetro da partícula constante para a concentração inicial de 0 g/L de NaCl.	71
Figura 45 – Simulação e dados experimentais para a concentração de 32 g/L de NaCl.	72
Figura 46 – Validação do modelo para a concentração de 32 g/L de NaCl.	72
Figura 47 – Desvio relativo do perfil de concentração simulado quando se considera a variação do diâmetro da partícula para a concentração inicial de 32 g/L de NaCl.	73
Figura 48 – Desvio relativo do perfil de concentração simulado quando se considera o diâmetro da partícula constante para a concentração inicial de 32 g/L de NaCl.	73

Figura 49 – Simulação e dados experimentais para a concentração de 64 g/L de NaCl.	74
Figura 50 – Validação do modelo para a concentração de 64 g/L de NaCl.	74
Figura 51 – Desvio relativo do perfil de concentração simulado quando se considera a variação do diâmetro da partícula para a concentração inicial de 64 g/L de NaCl.	75
Figura 52 – Desvio relativo do perfil de concentração simulado quando se considera o diâmetro da partícula constante para a concentração inicial de 64 g/L de NaCl.	75
Figura 53 – Simulação da fração volumétrica para a concentração inicial de 0 g/L de NaCl.	77
Figura 54 – Simulação da fração volumétrica para a concentração inicial de 32 g/L de NaCl.	77
Figura 55 – Simulação da fração volumétrica para a concentração inicial de 64 g/L de NaCl.	78
Figura 56 – Simulação do diâmetro da partícula para a concentração inicial de 0 g/L de NaCl.	79
Figura 57 – Simulação do diâmetro da partícula para a concentração inicial de 32 g/L de NaCl.	79
Figura 58 – Simulação do diâmetro da partícula para a concentração inicial de 64 g/L de NaCl.	80
Figura 59 – Simulação com 29 m de escoamento para a concentração inicial de 0 g/L de NaCl.	81
Figura 60 – Simulação com 29 m de escoamento para a concentração inicial de 32 g/L de NaCl.	82
Figura 61 – Simulação com 29 m de escoamento para a concentração inicial de 64 g/L de NaCl.	83
Figura 62 – Simulação com maior vazão volumétrica e mássica.	84
Figura 63 – Curva de calibração a 30 °C	96
Figura 64 – Curva de calibração a 35 °C	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais constituintes da camada salina.	8
Tabela 2 – Vantagens e desvantagens dos fluidos base água.	12
Tabela 3 – Vantagens e desvantagens dos fluidos base óleo.....	13
Tabela 4 – Aditivos para os fluidos de perfuração.....	14
Tabela 5 – Taxa de dissolução de NaCl e KCl m água pura para d diferentes temperaturas.	22
Tabela 6 – Valores dos coeficientes de transferência de massa.....	24
Tabela 7 – Coeficientes globais de transferência de massa estimados por Alkattan <i>et al.</i> (1997).	28
Tabela 8 – Coeficiente de transferência de massa obtidos por Magalhães <i>et al.</i> (2011)	29
Tabela 9 – Valores estimados para os coeficientes de transferência de massa	33
Tabela 10 – Valores estimados para os coeficientes de transferência de massa	34
Tabela 11 – Malha experimental proposta.	50
Tabela 12 – Variáveis de processo.	54
Tabela 13 – Número de Reynolds dos poços de petróleo.....	56
Tabela 14 – Número de Reynolds da unidade experimental para diferentes vazões volumétricas.	56
Tabela 15 – Distribuição granulométrica e diâmetro médio de Sauter amostras avaliadas	58
Tabela 16 – Dados experimentais para a concentração inicial de 0 g/L de NaCl.....	60
Tabela 17 – Resultados do balanço de massa para a concentração de 0 g/L de NaCl.	61
Tabela 18 – Dados experimentais para concentração inicial de 32 g/L de NaCl.....	62
Tabela 19 – Resultados do balanço de massa para a concentração de 32 g/L de NaCl.	63
Tabela 20 – Dados experimentais para concentração inicial de 64 g/L de NaCl.....	64
Tabela 21 – Resultados do balanço de massa para a concentração de 64 g/L de NaCl.	65
Tabela 22 – Coeficientes de globais de transferência de massa estimados.	66
Tabela 23 – Coeficientes de transferência de massa achados na literatura.	68

Tabela 24 – Desvio relativo médio para cada concentração inicial de NaCl.	76
Tabela 25 – Porcentagem de massa de NaCl dissolvido em determinadas distancias para a concentração inicial de 0 g/L.	82
Tabela 26 – Porcentagem de massa de NaCl dissolvido em determinadas distancias para a concentração inicial de 32 g/L.	82
Tabela 27 – Porcentagem de massa de NaCl dissolvido em determinadas distancias para a concentração inicial de 64 g/L.	83
Tabela 28 – Valores de concentração simulados para $Q = 5 \text{ L/s}$ e $w = 160 \text{ g/s}$	85
Tabela 29 – Resultados do balanço de massa para $Q = 5 \text{ L/s}$ e $W = 160 \text{ g/s}$	85
Tabela 30 – Cálculo dos desvios relativos para o experimento 1.	97
Tabela 31 – Cálculo dos desvios relativos para o experimento 4.	97
Tabela 32 – Cálculo dos desvios relativos para o experimento 7.	97
Tabela 33 – Cálculo dos desvios relativos para o experimento 10.	97
Tabela 34 – Cálculo dos desvios relativos para o experimento 13.	98
Tabela 35 – Cálculo dos desvios relativos para o experimento 2.	98
Tabela 36 – Cálculo dos desvios relativos para o experimento 5.	98
Tabela 37 – Cálculo dos desvios relativos para o experimento 8.	98
Tabela 38 – Cálculo dos desvios relativos para o experimento 11.	99
Tabela 39 – Cálculo dos desvios relativos para o experimento 14.	99
Tabela 40 – Cálculo dos desvios relativos para o experimento 3.	99
Tabela 41 – Cálculo dos desvios relativos para o experimento 6.	99
Tabela 42 – Cálculo dos desvios relativos para o experimento 9.	100
Tabela 43 – Cálculo dos desvios relativos para o experimento 12.	100
Tabela 44 – Cálculo dos desvios relativos para o experimento 15.	100

NOMENCLATURA

a – Área superficial específica de transferência de massa das partículas de sal (m^2)

A – Área total do sólido (m^2)

A_{esc} – Área de escoamento (m^2)

A_p – Área superficial para uma população de sólidos (m^2)

C – Concentração da salmoura (g/L)

CA – Concentração de 'a'. (g/L)

CA^∞ – Concentração de 'a' considerando diluição infinita

C_0 – Concentração inicial da salmoura (g/L)

C^* – Concentração de saturação de NaCl em água (g/L)

D – Diâmetro (m)

\bar{D}_p – Diâmetro médio de Sauter

k – Índice de consistência

K – Coeficiente global de transferência de massa (m/s)

kt – Coeficiente de transferência de massa determinado pela relação entre o coeficiente de difusão e o coeficiente de camada limite (m/s)

mCl^- – Massa de Cl^- (Kg)

mNa^+ – Massa de Na^+ (Kg)

\dot{m}_s – Taxa de massa de sal adicionada (g/s)

\dot{m}_r – Taxa de massa de sal não dissolvida (g/s)

n – Índice de comportamento

$N_{a,z}$ – Fluxo molar de 'a' na direção 'z' (Kmol/ m^2)

N_p – Número de partículas

Q – Vazão volumétrica da fase líquida (L/s)

Re – Número de Reynolds

Sc – Número de Schmidt

Sh – Número de Sherwood

t – Tempo (s).

T – Temperatura (K)

V – Volume (m^3)

\bar{v}_z – Velocidade média de escoamento (m/s)

W – Vazão mássica de sólidos (g/s)

x_i – Fração volumétrica de sal

Z – Posição (m)

Letras Gregas.

δ – Coeficiente de camada limite (m)

ρ_s – Densidade da fase sólida (sal) (Kg/m³)

ε_s – Fração volumétrica de partículas de sal

ε_{s0} – Fração volumétrica inicial de partículas de sal

ϕ – Fator de esfericidade

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	1
1. INTRODUÇÃO	1
CAPITULO II	3
2. REVISÃO DA LITERATURA	3
2.1 Origem do petróleo.....	3
2.2 Perfuração de poços.	4
2.3 A camada do pré-sal brasileiro.....	6
2.4 Perfuração em camadas salinas.	8
2.4.1 Caracterização das rochas reservatório.	9
2.4.2 Definições sobre a geometria nos poços.....	9
2.4.3 Materiais apropriados para terminação de poços.....	9
2.4.4 Garantir condições adequadas para as operações de perfuração.	10
2.4.5 Controles de corrosão e remoção de contaminantes	10
2.4.6 Sistemas de ancoragem de plataformas	11
2.4.7 Problemas de logística	11
2.5 Fluidos de Perfuração.	11
2.5.1 Tipos de fluidos de perfuração.	11
2.5.2. Aditivos dos fluidos de perfuração.....	13
2.5.3 Funções dos fluidos de perfuração.	15
2.6. Reologia	15
2.6.1 Classificação dos fluidos quanto a reologia.....	16
2.6.2 Modelos reológicos	18
2.6.2.1 Modelo de Bingham.....	18
2.6.2.2 Modelo de Ostwald de Waale.....	18
2.6.2.3 Modelo de Herschell-Buckley	19

2.7 Dissolução de sais	20
2.7.1 Coeficiente global de transferência de massa	21
2.7.2 Cinética de dissolução de sais em diversos sistemas.....	21
CAPITULO III	35
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
3.1 Abordagem experimental	36
3.1.1 Montagem da unidade experimental.	38
3.1.2 Sistema de adição de sólidos.....	41
3.1.3 Caracterização das amostras de NaCl.....	43
3.1.4 Determinação da concentração de NaCl.....	46
3.1.5 Controle da vazão volumétrica de salmoura	48
3.1.6 Planejamento experimental.....	50
3.2 Modelagem matemática.	51
3.2.1 Variáveis do processo.	53
CAPITULO IV	55
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1 Avaliação do Número de Reynolds	55
4.2 Curvas de calibração.....	56
4.3 Caracterização das partículas de NaCl.....	58
4.4 Resultados Experimentais.....	59
4.4.1 Concentração de 0 g/L de NaCl	59
4.4.2 Concentração de 32 g/L de NaCl	62
4.4.3 Concentração de 64 g/L de NaCl	63
4.5 Estimação do coeficiente global de transferência de massa	65
4.6 Simulações do experimento e validação do modelo	69
4.7 Simulações da fração volumétrica de sólidos.....	76
4.8 Simulações do diâmetro médio das partículas	78

4.9 Simulações com condições diferentes das experimentais	80
4.9.1 Simulações com maior distância de escoamento.....	81
4.9.2 Simulações com maior vazão volumétrica e mássica	84
CAPITULO V	86
5. CONCLUSÕES	86
CAPITULO VI.....	88
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	88
CAPITULO VII.....	89
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
ANEXO A	94
ANEXO B	96
ANEXO C	97

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

Em anos recentes foram encontrados grandes reservatórios em território Brasileiro de petróleo em águas profundas e em baixo de camadas de sal na região denominada de Pré-sal. Estes reservatórios têm um elevado potencial de produção e a sua exploração permitiria ao Brasil ser um dos países com as maiores reservas de petróleo no mundo (RODRIGUES, 2015).

Para que a exploração destes reservatórios seja economicamente viável, é necessário superar desafios e limitações técnicas, principalmente na etapa de perfuração quando as camadas salinas são atravessadas. Um destes desafios é garantir boas condições para as operações. Para isso deve-se realizar um adequado controle dos fluidos de perfuração uma vez que cascalhos de sal podem se dissolver no fluido de perfuração, modificando assim suas propriedades fisicoquímicas e reológicas.

O presente trabalho dá continuidade à pesquisa de dissolução de sais em fluidos de perfuração realizada no Laboratório de Escoamento de Fluidos Giulio Massarani da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. O trabalho tem como objetivo complementar o conhecimento referente ao fenômeno de dissolução de sais em fluido de perfuração e estudará o fenômeno de dissolução das partículas de halita (NaCl) em água pura e salmoura a diferentes concentrações no escoamento ascendente em tubo. Para realizar o estudo, foi necessário projetar e construir uma unidade experimental que opere em condições semelhantes à da perfuração de poços de petróleo no pré-sal. Estas condições são: número de Reynolds semelhante, escoamento vertical ascendente do fluido, movimentação das partículas sólidas juntamente com o fluido. Na literatura é possível encontrar estudos sobre a dissolução de sais em salmouras em sistemas agitados, como os realizados por Simon (1981), Alkattan *et al.* (1997), Magalhães *et al.* (2011), Meneses (2016) e Carvalho (2017). Outros estudos foram realizados com partículas sólidas fixas com um fluido escoando no entorno desta como os realizados por como Aksel'rud *et al.* (1992) e Darby e Forsyth (1992), ainda estudos realizados em calha aberta como os realizados por

Patrão (2012) e Martins (2014). Este trabalho diferencia-se dos previamente mencionados devido à adição de partículas sólidas de NaCl ao fluido em escoamento e assim avaliar a variação da concentração em função da posição e do tempo.

Foi estimado o coeficiente global de transferência de massa, para isto foi utilizado um modelo matemático desenvolvido no Laboratório de Escoamento de Fluido Giulio Massarani, utilizado nos trabalhos realizados por Patrão (2012) e Martins (2014). O modelo baseia-se na conservação de massa da fase líquida e da fase sólida. Para a estimação do coeficiente global de transferência de massa foram utilizadas duas abordagens, a primeira considerou a variação do diâmetro das partículas de NaCl ao longo do processo e a segunda que considerou o diâmetro das partículas de NaCl constante, como foi considerado nos trabalhos realizados por Patrão (2012) e Martins (2014). A estimação do coeficiente global de transferência de massa foi realizada utilizando o programa MAXIMA escrito em linguagem computacional FORTRAN. Para realizar a estimação deste parâmetro e a validação do modelo, foram utilizados dados experimentais de variação de concentração em função da posição e do tempo. Com o intuito de validar o modelo, foram realizadas simulações para comparar os valores de concentração experimentais e os calculados pelo programa e uma vez validado o modelo matemático, foram realizadas simulações computacionais variando valores de entrada, por exemplo, distância de escoamento, área de escoamento, vazão volumétrica e vazão mássica.

O trabalho está dividido em 6 capítulos, onde o capítulo 2 aborda a revisão bibliográfica referente à pesquisa. O capítulo 3 refere-se a materiais e métodos, onde será descrita a unidade experimental e a metodologia adotada. O capítulo 4 refere-se a resultados e discussões, onde serão discutidos os dados experimentais, a estimação do parâmetro, a validação do modelo e as simulações computacionais realizadas. No capítulo 5 serão apresentadas as conclusões deste trabalho e o capítulo 6 apresenta sugestões para trabalhos futuros.

CAPITULO II

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Origem do petróleo.

Ao longo da história da humanidade, o petróleo, que literalmente significa *óleo de pedra*, tem sido usado por distintas culturas principalmente como combustível. Na cultura ocidental do século XIX a preocupação em obter uma fonte de energia luminosa foi fundamental para o crescimento e desenvolvimento tecnológico da indústria do petróleo (ROA, 1999).

Há quatrocentos milhões de anos através de grandes e inúmeros fenômenos geológicos como (erupções vulcânicas, movimentação de placas tectônicas, movimentação dos oceanos), grandes quantidades de restos vegetais e animais se depositaram no fundo de massas de água, sendo soterrados. Estes restos orgânicos foram decompondo-se e em de certas condições de pressão e temperatura transformaram-se em combustíveis fósseis (THOMAS, 2004). A Figura 1 apresenta um esquema de um reservatório de petróleo.

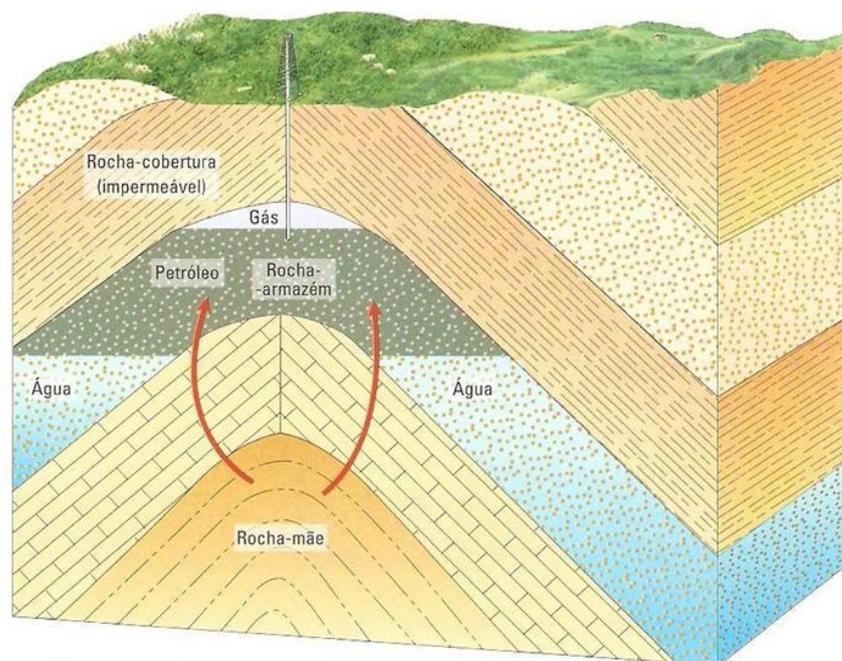


Figura 1 – Esquema de um reservatório de petróleo.
Fonte: Thomas (2004).

Inicialmente o petróleo se encontra nos poros da rocha geradora ou rocha mãe. O petróleo movimenta-se através dos poros das rochas condutoras, procurando regiões de menor pressão, em camadas mais superficiais, este fenômeno é conhecido como migração primária. Uma vez que o petróleo atinge uma região de menor pressão este fica confinado dentro de uma rocha de elevada porosidade que será denominada de rocha reservatório, a qual deve estar rodeada de rochas impermeáveis (alguns tipos de argilas, sal, entre outros), para impedir o escoamento do fluido. É por intermédio da perfuração de poços que se consegue extrair petróleo para seu posterior refino e comercialização (ROA, 1999).

2.2 Perfuração de poços.

Desde a antiguidade, a humanidade percebeu a necessidade de perfurar o solo para extrair as riquezas minerais, como, por exemplo, o sal, o carvão, o petróleo, dentre outros.

A produção de petróleo por meio da perfuração de poços começou formalmente em 1859 em *Titusville-Pennsylvania*, onde trituravam-se as formações rochosas por meio de uma lança com movimentos ascendentes e descendentes. Esta lança era fixa em um cabo que pendurava de uma torre, esta lança triturava as formações rochosas da superfície quando golpeava o solo no movimento descendente. Foi assim que o primeiro poço de Edwin Drake (conhecido mundialmente por ser o primeiro perfurador de poços de petróleo) chegou a produzir 3.000 barris por dia, este método foi denominado perfuração a percussão. Este método de perfuração apresentava certas limitantes como ser: a pouca profundidade que conseguia-se atingir, o inexistente controle das pressões de formação, a dificuldade para retirar os cascalhos de rocha triturada, dentre outros (ROA, 1999).

Na Figura 2 pode-se ver um esquema de uma unidade de perfuração a percussão utilizada na perfuração de poços de petróleo.

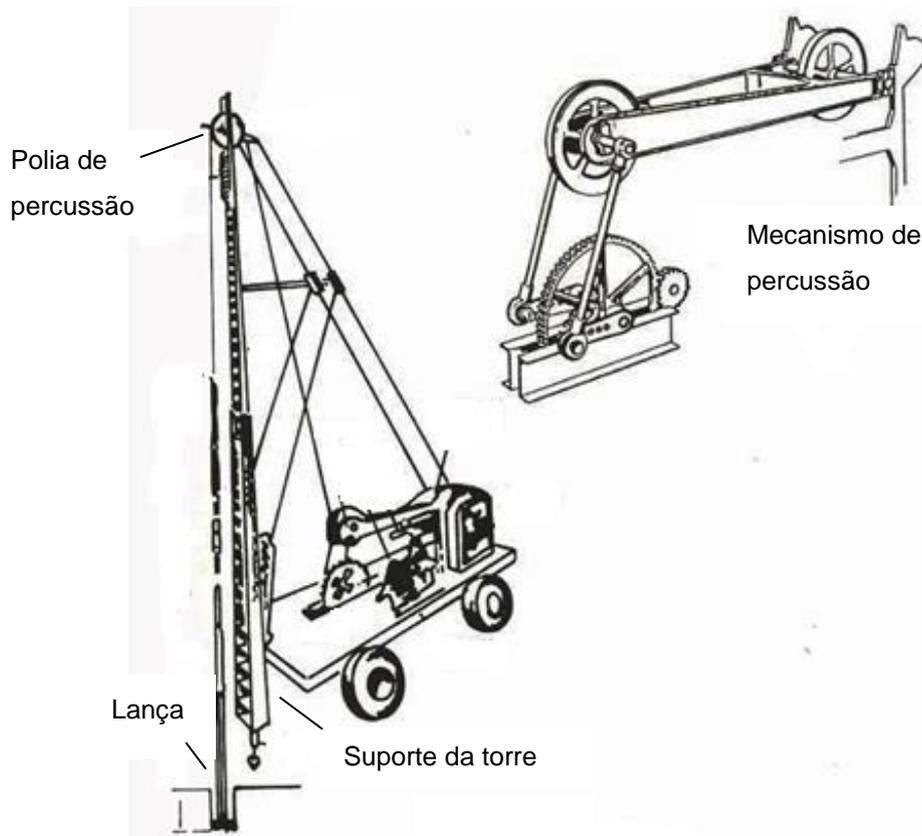


Figura 2 – Esquema de uma unidade de perfuração a percussão.
 Fonte: Adaptada de SENA COLOMBIA (1999).

O método de perfuração a percussão não atingia grandes profundidades. A partir de 1901, começou-se a utilizar o método de perfuração rotativa para atingir maiores profundidades. Este método conseguiu atingir maiores a profundidade, de 300 m (da perfuração a percussão) para 1800 metros em 1918 e 3000 metros em 1930 (YERGIN, 2010).

Atualmente, a indústria utiliza o método de perfuração rotativa tanto para poços *onshore* (em terra) como para poços *offshore* (em mar). Este método, caracteriza-se pela aplicação de rotação e peso sobre uma broca e com a circulação de um fluido de perfuração. A broca junto com a rotação e o peso exercido tem a função de triturar a rocha e o fluido de perfuração leva estes fragmentos de rocha triturada para superfície, entre outras funções (BRAGA, 2009).

Na Figura 3 pode-se observar um esquema de uma sonda de perfuração utilizada em campos *onshore*.

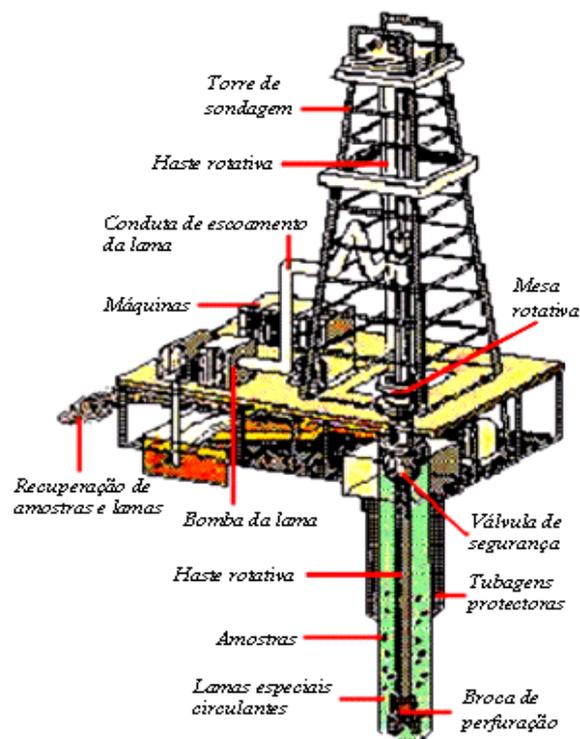


Figura 3 – Esquema de uma Sonda de perfuração.
 Fonte: Diário do pré-sal (2016).

No território brasileiro, a maioria dos poços perfurados encontram-se *offshore*. Neste tipo de poços, a pressão hidrostática no interior do poço deve ser superior a pressão de formação, com a finalidade de evitar influxo de fluidos de formação para dentro do poço e assim evitar *kicks* ou *blowouts*, mas deve ser inferior a pressão de fratura da formação para não danificar as formações rochosas (BARRETT *et al.*, 2005; GANDELMAN *et al.*, 2011).

O custo estimado das operações de perfuração *offshore* no Brasil está entre US\$ 500 mil a US\$ 600 mil por dia e devem ser ininterruptas para não acrescentar estes valores (MIELNIK *et al.*, 2009).

2.3 A camada do pré-sal brasileiro

Na década de 1950, acreditava-se que o Brasil possuía reservas de petróleo localizadas no oceano. Através de estudos realizados por geólogos da Petrobras, esta suposição foi confirmada, no ano de 1968, com a descoberta da região agora conhecida como pré-sal brasileiro. Devido ao pouco conhecimento deste tipo de

reservatórios e a falta de tecnologia da época não foi possível iniciar a produção de petróleo (COSTA, 2007).

A região denominada de pré-sal são formações no subsolo marinho onde encontram-se grandes reservas de petróleo e gás que se estende desde o litoral do estado do Espírito Santo até o litoral do estado de Santa Catarina. Esta extensão compreende uma área de 112 mil quilômetros quadrados, onde o petróleo encontra-se a uma profundidade aproximada de 3000 metros abaixo do solo marinho, possui uma gravidade API de 30º e apresenta baixa acidez e baixo teor de enxofre (OLIVEIRA *et al.* 1985; MORAIS, 2013).

Geologicamente o pré-sal é uma sequência de rochas sedimentares (carbonatos microbiais) formado a aproximadamente 100 milhões de anos devido à separação do continente Gondwana, que deu origem aos continentes americano e africano. Caracteriza-se por se encontrar abaixo de uma extensa camada de sal de aproximadamente 2000 metros de espessura composta principalmente por 78,04% por cloreto de sódio. Na Figura 4 podemos ver o perfil geológico simplificado do pré e na Tabela 1 pode ser vista a composição da camada salina e sal (ANDRADE, 1980; OLIVEIRA, 1985).

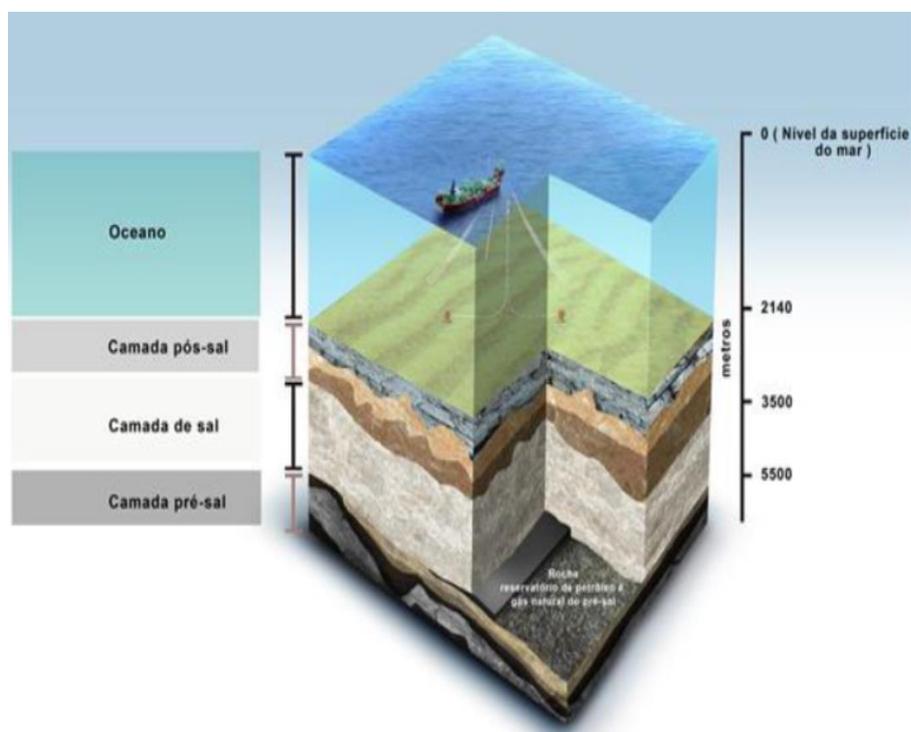


Figura 4 – Esquema do perfil geológico do pré-sal.
Fonte: PETROBRAS (2013).

Constituinte	Porcentagem
NaCl	78,04
MgCl ₂	9,21
MgSO ₄	6,53
CaSO ₄	3,48
KCl	2,21
CaCO ₃	0,33
MgBr ₂	0,25
SrSO ₄	0,05

Tabela 1 – Principais constituintes da camada salina.
 Fonte: Andrade (1980).

Com o desenvolvimento da tecnologia, entre os anos 2000 e 2001, a Petrobras decide desenvolver projetos de exploração na procura de reservatórios de petróleo na região do pré-sal em áreas da bacia de Santos. No começo do ano 2003 se indica que através da interpretação de dados sísmicos obtidos na exploração, a existência de hidrocarbonetos abaixo da camada de sal é uma possibilidade real. Em meados do mesmo ano, depois de superar divergências de opiniões dentro da companhia, é que se decide começar com as atividades de perfuração de poços. O ano 2010 marca o início da produção comercial na região do pré-sal. Estima-se que para o ano 2020 a produção será de 2 milhões de barris de petróleo por dia, representando 47% da produção total de petróleo no Brasil (MORAIS, 2013).

2.4 Perfuração em camadas salinas

Através do incremento da produção do pré-sal, o desenvolvimento de tecnologias que ajudem a minimizar os custos de produção é essencial. Morais (2013) afirma que os recursos econômicos destinados a pesquisa aumentaram de 685 milhões de dólares em 2009 a 1454 milhões em 2011. Segundo Beltrão (2009), algumas dificuldades técnicas existentes para explorar esta região devem ser superadas primeiramente para melhorar e garantir o bom desempenho das diferentes operações para produzir hidrocarbonetos. Na continuação serão descritas algumas das principais dificuldades para operar na região do pré-sal.

2.4.1 Caracterização das rochas reservatório

Um dos maiores desafios do pré-sal é caracterizar as rochas reservatório. Estas rochas estão formadas principalmente por carbonatos microbiais dos quais não se tem muito conhecimento, principalmente das propriedades físicas e químicas, assim como das melhores condições requeridas para produzir petróleo. Um maior conhecimento destas rochas ajudará a avaliar o fluxo de petróleo na produção primária, além de ajudar a definir os mecanismos de produção secundária, terciária e auxiliará a melhorar a taxa de penetração (BELTRÃO *et al.*, 2009; FORMIGLI *et al.*, 2009; MORAIS, 2013).

2.4.2 Definições sobre a geometria dos poços

A camada de sal encontrada em cima dos reservatórios do pré-sal originou-se devido a evaporação da água do mar no processo de separação continental de Gondwana, o que ocasionou a sedimentação de diferentes tipos de sal. Quando se está perfurando a elevadas taxas de cisalhamento através desta camada, os diferentes tipos de sal podem se comportar como um fluido, escoando juntamente com o fluido de perfuração, este fenômeno ocasiona uma geometria mal definida para o poço. O que poderá ocasionar desmoronamentos e dificuldades na terminação do mesmo (MORAIS, 2013).

2.4.3 Materiais apropriados para terminação de poços

Uma vez finalizada a perfuração de um trecho ou de uma etapa, inicia-se a introdução de tubulações de aço para as operações de revestimento do poço. Na camada salina, tem-se dificuldades para realizar o revestimento do poço devido a sua maleabilidade, a pressão e o fluxo exercidos pelo sal podem deformar as tubulações de revestimento.

É por isso que estão sendo desenvolvidas tubulações com matérias mais resistentes capazes de suportar a pressão desta formação e com um peso capaz de não prejudicar a capacidade da plataforma (BELTRÃO, 2009).

2.4.4 Garantir condições adequadas para as operações de perfuração

Com o objetivo de identificar e reportar os problemas relacionados à perfuração de poços no pré-sal, Oliveira *et al.* (1985) estudaram 26 poços exploratórios que foram perfurados na bacia de campos pertencente à região. Alguns dos problemas identificados podem ser alta pressão no topo ou na base, perda de circulação, prisão da coluna de perfuração, dissolução de sal no fluido de perfuração dentre outros, onde o problema mais comum registrado foi o a prisão da coluna de perfuração.

Os fluidos de perfuração também são afetados quando se perfura a região do pré-sal, por exemplo os cascalhos de sal podem-se dissolver nos fluidos a base de água, modificando suas propriedades físico-químicas e reológicas. Desta forma o conhecimento do perfil de dissolução do sal em diferentes fluidos de perfuração é de grande importância para avaliar corretamente a modificação das propriedades do fluido utilizado durante a perfuração (MARTINS, 2014).

Medeiros (1999) diz que os problemas mencionados ocorrem apenas quando se começa a perfurar a camada salina, devido à falta de ajuste dos parâmetros de perfuração e das propriedades do fluido de perfuração para operar nessa região.

2.4.5 Controles de corrosão e remoção de contaminantes

Os primeiros testes que foram realizados no pré-sal indicaram uma elevada quantidade de ácido sulfídrico (H_2S) e dióxido de carbono (CO_2) associados ao gás natural assim como o alto índice de cloreto presente na água.

Segundo Beltrão (2009), unidades de separação de CO_2 são contempladas nos planos de produção com o objetivo de utilizar este CO_2 como fluido de injeção em operações de recuperação avançada, enquanto à remoção de H_2S vem-se estudando a factibilidade de unidades de remoção deste contaminante nas plataformas.

Os contaminantes já mencionados, junto com a presença de cloreto na água, promovem a corrosão nos equipamentos de aço, como por exemplo a coluna de produção e os *risers*. Morais (2013) comenta que o uso de produtos químicos que inibem a corrosão não é a solução para evitar este problema, por isso ressalva a necessidade de utilizar ligas de metais e aços especiais nos equipamentos.

2.4.6 Sistemas de ancoragem de plataformas

Segundo Morais (2013), a Petrobras utiliza aproximadamente 20 linhas de amarração para ancorar as unidades estacionárias de produção em regiões onde a profundidade está ao redor de 1800 metros, na região do pré-sal onde a profundidade e a distância da costa são maiores é necessário incrementar o número de linhas de amarração para 24, devido à maior força e tamanho das ondas.

2.4.7 Problemas de logística

Segundo Formigli *et al.* (2009), a grande distância entre a costa e a região produtora do pré-sal, juntamente com as condições climatológicas desta levantam diversos problemas de logística como ser:

- Transporte de pessoal, equipamentos e materiais;
- Disponibilidade de plataformas de perfuração e intervenção.

Devido ao incremento da produção no pré-sal os procedimentos de logística devem ser melhorados continuamente.

2.5 Fluidos de Perfuração.

Um fluido de perfuração pode ser definido como uma mistura complexa de líquidos, sólidos e aditivos químicos, utilizado na perfuração de poços de petróleo, que dependendo do estado físico dos seus componentes pode ser uma emulsão, suspensão ou dispersão coloidal com propriedades físico-químicas específicas em relação as condições de operação requeridas. Estes fluidos não devem ser corrosivos, abrasivos, devem ser bombeáveis, estáveis quimicamente além de serem imunes ao desenvolvimento de bactérias (THOMAS 2004).

2.5.1 Tipos de fluidos de perfuração.

Os fluidos de perfuração são classificados em três tipos, sendo eles:

- a) Fluidos à base de água: este tipo de fluido caracteriza-se porque a fase contínua esta composta por água, doce ou salgada, e a fase dispersa por sólidos reativos e inertes (BOURGOYNE JR *et al.*, 1991).

Estes tipos de fluidos são os mais usados na perfuração de poços, devido ao menor custo de operação, tratamento mais fácil e menor impacto ambiental, geralmente usados para perfurar formações não reativas, produtoras ou não produtoras (PDVSA, 2002).

Algumas vantagens e desvantagens dos fluidos base água são apresentados na Tabela 2.

Vantagens	Desvantagens
✓ Menos agressivo ao meio ambiente;	✓ Menor estabilidade a altas temperaturas;
✓ Facilita a detecção de gás;	✓ Não são adequados em operações exigentes de perfuração;
✓ Maior taxa de penetração da broca;	✓ Não podem ser usados em argilas sensíveis ao água.
✓ Permite um maior número de perfis que podem ser executados;	
✓ Maior facilidade no combate à perda de circulação;	
✓ Menor custo inicial.	

Tabela 2 – Vantagens e desvantagens dos fluidos base água.
Fonte: Rossi e Guimarães (2009).

- b) Fluidos à base de óleo: este tipo de fluido caracteriza-se pela a fase continua ser composta por um óleo, geralmente um hidrocarboneto e a fase dispersa é composta por água ou salmoura, formando assim uma emulsão estável (BOURGOYNE JR *et al.*, 1991).

Estes tipos de fluidos são usados como fluidos de terminação ou para perfuração de poços de produção uma vez que não reagem com as argilas e sua filtração não ocasionar danos às formações. Eles possuem elevados custos de operação e um alto impacto ambiental.

Existem dois tipos de fluidos à base de óleo: emulsões inversas onde o óleo é a fase continua (80%) e a água a fase dispersa, e as emulsões diretas onde o óleo está disperso na fase contínua (água), podendo a mesma ser à 50% do fluido (PDVSA, 2002).

Algumas vantagens e desvantagens dos fluidos base óleo são apresentados na Tabela 3.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Propriedades reológicas estáveis e controláveis a temperaturas acima de 500 °F; ✓ São efetivos contra todo tipo de corrosão; ✓ Possuem grau de lubricidade superior; ✓ Permitem operabilidade com baixas densidades do fluido de perfuração. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Alto custo inicial; ✓ Requerem mais operações de controle a poluição; ✓ Dificuldade no combate à perda de circulação; ✓ Dificuldade na detecção de gás no poço devido à solubilidade do gás na fase óleo.

Tabela 3 – Vantagens e desvantagens dos fluidos base óleo.
Fonte: Bourgoyne Jr *et al.* (1991).

- c) Fluidos pneumáticos: dependendo das condições de operação pode-se usar ar comprimido ou gás natural como fluido de perfuração, estes são comumente usados quando a pressão hidrostática é menor que a pressão de formação, o uso deste tipo de fluido só é aplicável em zonas onde a presença de água de formação é mínima, pode-se adicionar algum agente espumante para melhorar a capacidade de levar fragmentos de rocha para a superfície (BAKER HUGHES, 1995).

2.5.2. Aditivos dos fluidos de perfuração

Existem diferentes aditivos a serem usados nos fluidos de perfuração. A utilização destes dependerá da função específica do fluido. Existe uma grande variedade de aditivos que ajudam ao fluido de perfuração a cumprir com sua função. Alguns tipos de aditivos e suas respectivas funções quando são adicionados ao fluido de perfuração são detalhados na Tabela 4.

Função	Aditivos mais usados	Efeitos do aditivo no fluido
Controle de pH	Cal, soda caustica e outros ácidos.	Controlar o grau de acidez (pH) para diminuir a corrosão dos equipamentos de perfuração.
Densificantes	Barita, chumbo, óxidos de ferro.	Controlar pressões naturais das formações pelo aumento da densidade dos fluidos.
Viscosificantes	Bentonita, vários tipos de argilas e polímeros (CMC, goma xantana).	Aumentar a viscosidade para melhorar a limpeza do poço e suspensão dos fragmentos de rocha.
Redutores de filtrado	Bentonita, argilas, amido, CMC, lignita.	Diminuir a perda de fluido que flui da coluna de perfuração para os poros das formações.
Floculantes	Salmoura, cal, diversos tipos de sais e polímeros.	Agrupar as partículas sólidas em flocos, aumentando a limpeza do poço.
Dispersantes ou defloculantes	Polifosfatos, lignita e lignosulfatos.	Reduzir o aglomeramento das partículas em flocos, diminuindo a viscosidade e a força gel.
Lubrificantes	Diversos tipos de óleo, surfactantes, glicóis.	Reduzir o atrito da lama e resfriar os equipamentos de perfuração (broca e coluna).
Estabilizadores de temperatura	Diversos tipos de polímeros, copolímeros, lignita	Aumentar a estabilidade térmica e estrutural em temperaturas elevadas.
Tensoativos	Surfactantes e umidificantes.	Reduzir a tensão superficial entre as superfícies de partículas em contato (água/óleo, água/sólidos).
Emulsificantes	Ácidos graxos e orgânicos, amina, sabões e detergentes.	Criar e manter uma mistura heterogênea de dois líquidos imiscíveis (emulsão de água/óleo).
Bactericidas	Cal, soda caustica e paraformaldeídos.	Reduzir a contagem de bactérias e prevenir a degradação bacteriana de aditivos orgânicos.
Removedores de cálcio	Soda caustica, bicarbonato de sódio e alguns polifosfatos.	Prevenir a contaminação das formações rochosas de diversas formas de sulfato de cálcio.
Inibidores de corrosão	Coloides, emulsões e fluidos base óleo.	Inibir a corrosão, através da neutralização de gases ácidos.

Tabela 4 – Aditivos para os fluidos de perfuração.
Fonte: Adaptado de Carvalho (2005).

2.5.3 Funções dos fluidos de perfuração.

Segundo o *American of Petroleum Institute* (2001) as principais funções de um fluido de perfuração são:

- Controle das pressões de subsolo;
- Levar fragmentos de rocha para a superfície;
- Suspender os fragmentos de rocha no poço quando se deseja parar a circulação;
- Resfriar e lubrificar a broca;
- Formar uma camada impermeável nas paredes do poço;
- Facilitar a cimentação e terminação do poço;
- Garantir a adequada avaliação da formação;
- Minimizar o impacto ambiental.

2.6. Reologia

A reologia é a ciência que descreve a deformação de um corpo (sólido, fluido) sob a influência de tensões. Sólidos ideais deformam-se elasticamente e a energia requerida para deformar o fluido é recuperada completamente quando as tensões são retiradas. Fluidos reais deformam-se irreversivelmente onde a energia requerida para deformar o fluido é dissipada em forma de calor e não pode ser recuperada quando as tensões são retiradas (DESHPANDE *et al.*, 2010).

O objetivo da reologia é determinar o tipo de fluxo no fluido quando se aplicam forças que são necessárias para o fluido escoar. Sua importância é reconhecida na análise de perfis de velocidade, viscosidade do fluido, perda de circulação e limpeza da seção anular. Dentro deste contexto o controle das propriedades reológicas do fluido de perfuração é crítico para evitar perdas financeiras e de tempo e em casos extremos o fechamento ou abandono do poço (DESHPANDE *et al.*, 2010; DHIMAN 2012).

A principal propriedade reológica dos fluidos de perfuração a ser controlada é a viscosidade, segundo Machado (2002) a viscosidade descreve a resistência ao fluxo de um fluido, esta viscosidade pode ser alterada por diversos fatores como:

- a) Pressão e Temperatura. A temperatura é um parâmetro que influencia de grande forma a viscosidade. Um incremento da temperatura provocará uma diminuição na viscosidade para os líquidos e um aumento na viscosidade para os gases. O efeito da temperatura é maior para os fluidos base óleo que para os fluidos à base de água, e também será maior para aqueles fluidos que dentro da sua composição contenham compostos sintéticos. Diferentemente da temperatura, a pressão afeta muito menos a viscosidade, devido ao baixo fator de compressibilidade da maioria dos fluidos de perfuração. Os fluidos a base de óleo, e os que apresentam compostos sintéticos na sua composição, são compressíveis até certo ponto, assim um incremento da pressão resultará no aumento da viscosidade devido à diminuição do espaço intermolecular (API, 2001; MACHADO, 2002).
- b) Taxa de cisalhamento. A taxa de cisalhamento é um parâmetro a ser controlado, para os fluidos newtonianos uma variação da taxa de cisalhamento não afetará a viscosidade, mas para os fluidos não newtonianos um aumento da taxa de cisalhamento poderá, dependendo do tipo de fluido, ocasionar aumento ou diminuição da viscosidade (MACHADO, 2002).
- c) Tempo. Alguns tipos de fluidos podem apresentar uma modificação na sua viscosidade com o tempo quando são cisalhados a uma taxa constante, dependendo do tipo de fluido, a viscosidade pode aumentar ou diminuir com o tempo, uma vez que o cisalhamento é retirado o fluido poderá recuperar total ou parcialmente sua viscosidade inicial (MACHADO, 2002; KUMARAN, 2010).

Para o caso dos fluidos utilizados no pré-sal a adição de partículas salinas quando se perfura a camada de sal modificará a viscosidade, gerando um incremento nesta, além de ocasionar um incremento da força gel, dificultar o controle de filtrado, promover a corrosão dos equipamentos e gerar espuma, o conjunto de problemas mencionados ocasionará uma alteração na qualidade do fluido e das operações de perfuração.

2.6.1 Classificação dos fluidos quanto a reologia

Os fluidos de perfuração podem ser classificados em dois grupos que dependem do parâmetro viscosidade, estes grupos são:

- a) Fluidos newtonianos. Estes tipos de fluidos caracterizam-se porque a viscosidade é independente da taxa de cisalhamento, então a tensão de cisalhamento será diretamente proporcional à taxa de cisalhamento. O comportamento do fluxo poderá ser descrito pela lei de Newton da viscosidade, representada pela equação (1), alguns fluidos deste tipo são a água, os óleos leves, a glicerina, dentre outros (DHIMAN, 2012).

$$\tau = \mu\gamma \quad (1)$$

Onde τ é a tensão de cisalhamento, μ é a viscosidade do fluido e γ é a taxa de cisalhamento.

- b) Fluidos não newtonianos. Para estes fluidos a relação entre a taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento não é linear. A viscosidade passa a depender da taxa de cisalhamento, passando a ser chamada de viscosidade aparente (MACHADO, 2002; MAESTRO, 2002). Segundo Dhiman (2012), se o valor da viscosidade aparente é independente do tempo e diminui com o incremento da taxa de cisalhamento o fluido pode ser classificado como pseudoplástico e se aumenta com o incremento da taxa de cisalhamento o fluido pode ser classificado como dilatante. Bourgoyne (1991) menciona que se o valor da viscosidade aparente é dependente da taxa de cisalhamento e do tempo este pode ser classificado como tixotrópico, se a viscosidade aparente diminui com o tempo depois de ser aplicada uma taxa de cisalhamento constante, e como reopético, se a viscosidade aparente incrementa com o tempo depois de ser aplicada uma taxa de cisalhamento constante.

Para caracterizar e determinar os parâmetros reológicos além do comportamento de determinado fluido, são necessários modelos matemáticos que relacionam os valores de tensão de cisalhamento e da taxa de cisalhamento (MENESES, 2016).

2.6.2 Modelos reológicos

2.6.2.1 Modelo de Bingham

Bingham (1922) foi o primeiro a identificar a plasticidade dos fluidos, estes fluidos se diferenciavam dos fluidos newtonianos visto que precisavam de uma tensão inicial para escoar. Desta forma, o fluido que segue o modelo de Bingham caracteriza-se por requerer uma tensão mínima de escoamento (τ_o), uma vez que esta foi excedida a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento é diretamente proporcional e a constante de proporcionalidade é conhecida como viscosidade plástica (μ_p) (CLARK, 1995; DHIMAN, 2012). As equações (2) e (3) representam matematicamente o modelo de Bingham.

$$\tau = \mu_p \gamma + \tau_o \text{ para } \tau > \tau_o , \quad (2)$$

$$\gamma = 0 \quad \text{para } \tau < \tau_o , \quad (3)$$

onde, τ é a tensão de cisalhamento, μ_p é a viscosidade plástica do fluido, γ é a taxa de cisalhamento e τ_o é tensão mínima de escoamento.

A viscosidade aparente pode ser calculada com a seguinte equação:

$$\mu_{ap} = \mu_p + \frac{\tau_o}{\gamma} \quad (4)$$

Alguns exemplos de fluidos que seguem o modelo de Bingham são as suspensões diluídas de sólido em líquido em geral, suspensões de bentonita em água, algumas dispersões de calcita em água, dentre outras (MACHADO, 2002).

2.6.2.2 Modelo de Ostwald de Waale

O modelo de Ostwald de Waale, também conhecido como modelo de lei da potência, pode ser expresso pela seguinte equação:

$$\tau = k\gamma^n \quad (5)$$

Onde o parâmetro k o índice de consistência que indica o grau de resistência ao escoamento e o parâmetro n é o índice de comportamento que determina a natureza newtoniana ou não newtoniana do fluido. Valores de n iguais a unidade representam fluidos newtonianos, valores maiores que zero e menores que um representam os fluidos pseudoplásticos (emulsões, soluções poliméricas ou de macromoléculas) e valores superiores a unidade representam a fluidos dilatantes (pastas dentifrícias, dispersões de polímeros, resinas, algumas pastas de cimento) (MACHADO, 2002).

2.6.2.3 Modelo de Herschell-Buckley

O modelo de Herschell-Buckley, também conhecido como modelo de potência modificado, é uma combinação do modelo de Bingham visto que apresenta uma tensão mínima de escoamento com o modelo de lei da potência, apresentando os índices de consistência (k) e índice de comportamento (n). Matematicamente pode ser representado pelas seguintes equações:

$$\tau = k\gamma^n + \tau_o \quad \text{para } \tau > \tau_o \quad (6)$$

$$\gamma = 0 \quad \text{para } \tau \leq \tau_o \quad (7)$$

Como o modelo de Herschell-Buckley contempla três parâmetros (k , n , τ_o), ele é mais completo para caracterizar o comportamento reológico de um fluido. Alguns fluidos que apresentam este comportamento são as dispersões de argilas com polímeros, graxas, pastas de cimento, dentre outros (MACHADO, 2002).

Na Figura 5 podemos observar as curvas de escoamento para cada modelo apresentado anteriormente.

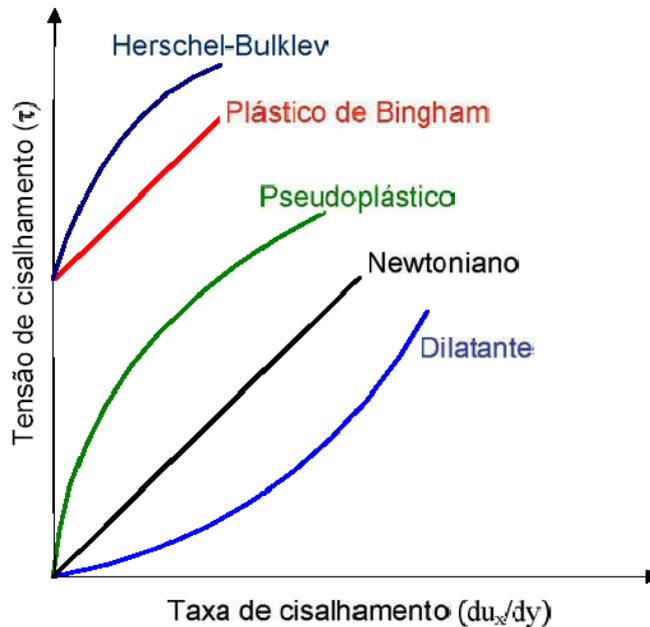


Figura 5 – Curvas de escoamento de fluido newtoniano e fluido não-newtoniano. Fonte: Adaptado de Machado (2002).

2.7 Dissolução de sais

2.7.1 Transferência de massa

Nas operações que envolvem transferência de massa, a força motriz encargada de realizar o processo é a diferença de concentração, da mesma forma que a diferença de temperatura é a força motriz na transferência de calor. A análise quantitativa da transferência de massa baseia-se em balanços de matéria e energia, equilíbrio e velocidade de transferência de massa e calor (McCabe *et al.* 1998). Segundo Cremasco (2009) o fenômeno de transferência de massa pode ser representado pela equação 8.

$$\text{Movimento da materia} = \frac{\text{Força motriz}}{\text{Resistência ao transporte}} \quad (8)$$

Onde a resistência está relacionada com a interação soluto-meio e forças externas, relacionadas com as características dinâmicas do meio e da geometria onde se realiza o processo.

2.7.1 Coeficiente global de transferência de massa

A convecção mássica é um fenômeno macroscópico de transferência de massa, onde a diferença de concentração é a força motriz do fenômeno. A resistência ao transporte relaciona-se à interação do soluto-meio com uma força externa, considerando um soluto que se difunde em líquido em regime permanente, o fenômeno pode ser representado pela equação (9) (BIRD *et al.*, 2002).

$$N_{A,z} = K(C_A - C_{A\infty}) , \quad (9)$$

onde, $N_{A,z}$ é o fluxo molar do soluto A na direção z, K é o coeficiente de transferência de massa e $(C_A - C_{A\infty})$ é a diferença de concentração entre o soluto e o meio.

Como a diferença de concentração é a força motriz do fenômeno, pode-se dizer que o coeficiente convectivo está relacionado com a resistência à transferência de massa.

$$K \equiv \frac{1}{(\text{Resistência à convecção mássica})} \quad (10)$$

O coeficiente de transferência de massa dependerá das características do meio onde ocorre o processo, assim como da interação do soluto com o meio. O cálculo deste coeficiente é um dos maiores problemas da transferência de massa (BIRD *et al.*, 2002; CREMASCO, 2002).

2.7.2 Cinética de dissolução de sais em diversos sistemas.

Durie e Jessen (1964), estudaram a dissolução de sais devido à lixiviação de sal em cavernas de mineração. Os autores concluíram que a taxa de remoção de sal de uma parede está relacionada com a concentração de salmoura no corpo hídrico da caverna e que o processo acontece em regime laminar.

Simon (1981) estudou a influência da temperatura na taxa de dissolução de NaCl e KCl em água pura. Ele utilizou discos comprimidos de sal pulverizado, estes

se dissolviam em uma célula cilíndrica que se encontrava sobre agitação mecânica (200 rpm), a diferentes temperaturas. A unidade experimental pode ser vista na Figura 6.

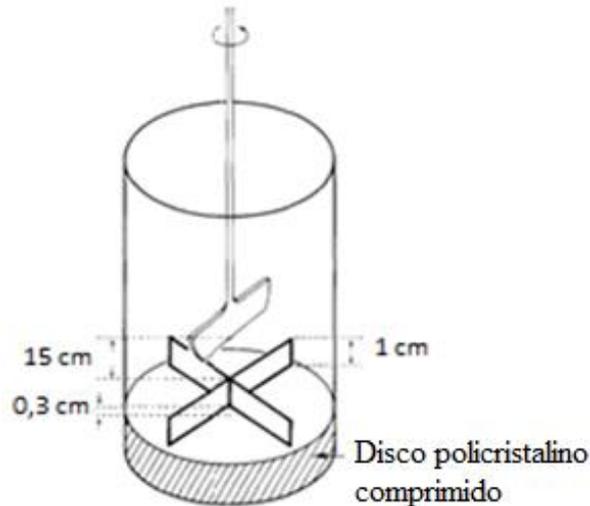


Figura 6 – Esquema da célula de dissolução utilizada por Simon.
Fonte: Adaptado de Simon (1981).

Leituras de concentração foram realizadas a intervalos de tempo. Para avaliar a taxa da dissolução foi utilizada a equação 11.

$$V = K_0(C_s - C) , \tag{11}$$

onde, V é a taxa de dissolução, K_0 é o coeficiente de transferência de massa, C_s é a concentração de saturação, C a concentração da solução.

Os resultados obtidos podem ser vistos na Tabela 5. O autor conclui que a dissolução de partículas é diretamente influenciada pela temperatura, quanto maior é a temperatura, maior é o coeficiente de dissolução, ou seja, o aumento da temperatura favorece a ocorrência da dissolução.

T(°C)		9	14	20	23,5	26	27	43
$V \cdot 10^3$	NaCl	-	0,48	0,55	-	0,69	-	1,04
(cm/s)	KCl	0,46	-	0,73	0,82	-	1,26	

Tabela 5 – Taxa de dissolução de NaCl e KCl m água pura para diferentes temperaturas.

Fonte: Adaptado de Simon (1981).

Aksel'rud *et al.* (1992) estudaram o coeficiente de transferência de massa para diferentes tipos de sal suspensos em um fluxo líquido. Os autores utilizaram água destilada como solvente e uma unidade experimental em circuito fechado. Uma bomba centrífuga, bombeia o solvente (água destilada) para o reator, onde encontrava em contato com as partículas cilíndricas de sal. A unidade utilizada neste trabalho é apresentada na Figura 7.

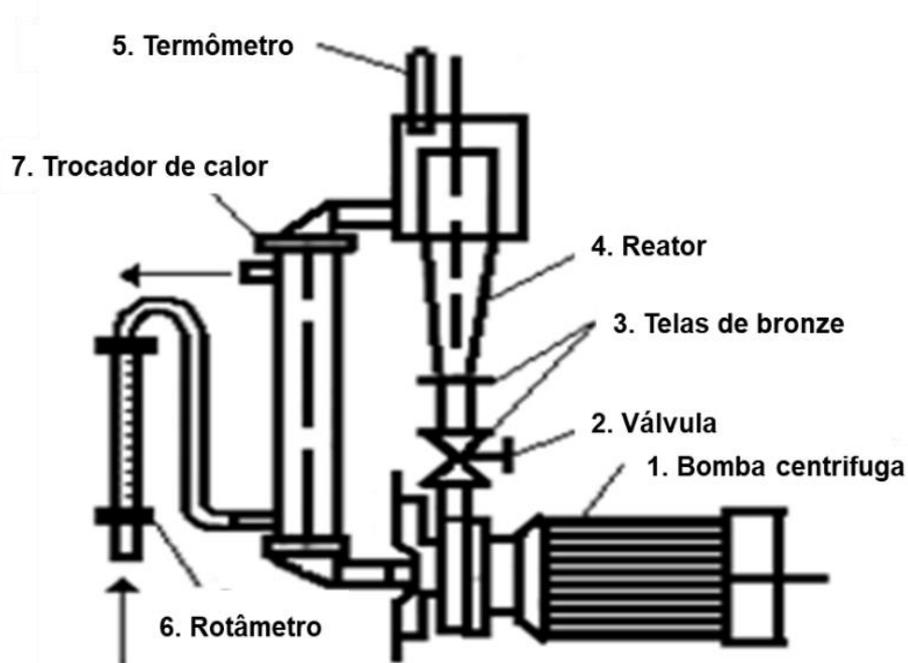


Figura 7 – Esquema da unidade experimental utilizada por Aksel'rud *et al* (1992).
 Fonte: Adaptada de Aksel'rud *et al.* (1992).

Foram utilizados diferentes tipos de sais, considerou-se a concentração de sal em função do tempo para calcular o coeficiente de transferência de massa através da seguinte equação:

$$-\frac{dm_{sal}}{dt} = K \cdot A(C^* - C) , \quad (12)$$

$$A = \frac{3\pi}{2} \cdot \left(\frac{4m}{\pi \cdot \rho}\right)^{\frac{2}{3}} , \quad (13)$$

onde, m_{sal} é a massa de sal solubilizada, t é o tempo, K o coeficiente de transferência de massa, A é área total da transferência de massa, C^* é a concentração de saturação

do sal, C é a concentração instantânea do sal e ρ é a densidade. A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos no trabalho.

Sal	$K \cdot 10^4$ (m/s)
KI	3,15
KBr	2,069
K ₂ Cr ₂ O ₇	0,868
K ₂ SO ₄	0,731
NaNO ₃	0,881
NaNO ₂	0,458
NaCl	1,00
(NH ₄) ₂ Cr ₂ O ₇	0,793
KCl	1,338
(NH ₄) ₂ SO ₄	0,652
NH ₄ NO ₃	1,169
NH ₄ Cl	1,052

Tabela 6 – Valores dos coeficientes de transferência de massa.
Fonte: Aksel'rud *et al.* (1992).

Darby e Forsyth (1992) estudaram a cinética de dissolução de sais em fluidos de perfuração. No estudo utilizaram dois tipos de fluidos fornecidos pela *Exxon Production Research Company* (EPR), o primeiro com uma composição de $70 \frac{kg}{m^3}$ de atapulguita, $30 \frac{kg}{m^3}$ de barita, $4 \frac{kg}{m^3}$ de poliestireno maleico anidro, $200 \frac{mg}{kg}$ de CaCO₃ e uma concentração de NaCl de $15 \frac{kg}{m^3}$, o segundo um fluido polimérico com uma concentração de $3,8 \frac{kg}{m^3}$ de goma xantana, 5% de NaCl, sem aditivos sólidos. Os fluidos estudados eram armazenados em um tanque de 15 L e bombeados através de um canal retangular, com velocidades de até $0,762 \frac{m}{s}$ e temperaturas até de 464 K, onde um bloco de rocha salina (0,05X0,1 m) era posicionado. A rocha era composta principalmente por partículas de halita (NaCl) de elevada pureza. Os fluidos estudados entravam em contato com o bloco de sal e avaliava-se a taxa de dissolução quando o fluido chegava no segundo tanque de armazenamento. A avaliação da taxa de dissolução foi feita através da medição da condutividade dos fluidos e pela pesagem

direta do bloco de sal após o processo. A unidade experimental utilizada é apresentada na Figura 8.

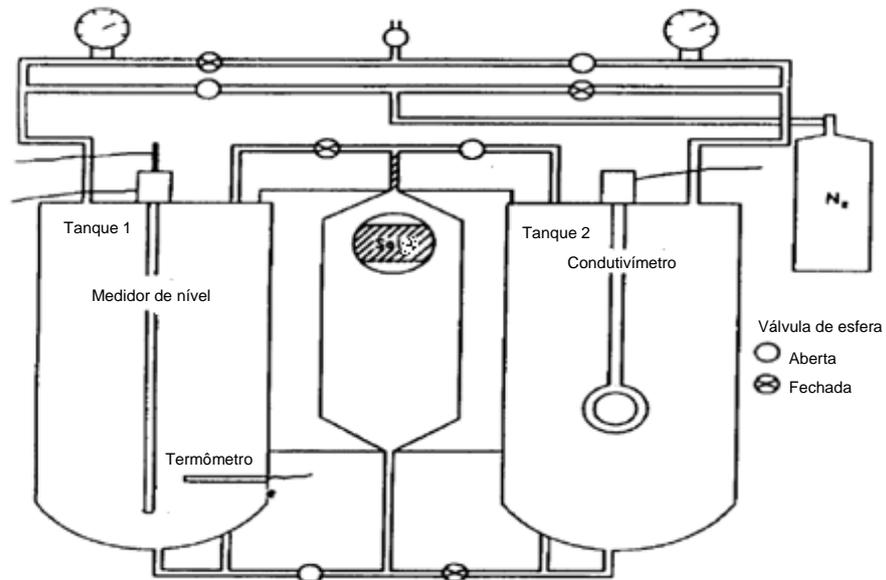


Figura 8 – Esquema da unidade experimental utilizada por Darby e Forsyth.
Fonte. Adaptada de Darby e Forsyth (1992).

A cinética de dissolução foi avaliada utilizando uma abordagem matemática focada nos números adimensionais de Reynolds (equação 14), Sherwood (equação 15) e Schmidt (equação 16). Para auxiliar o cálculo do número de Sherwood foi utilizada a equação (17) que relaciona os três números adimensionais propostos e a equação (18) determina a taxa de dissolução.

$$Re = \frac{dV\rho}{\mu} , \quad (14)$$

$$Sh = \frac{k_m d}{D} , \quad (15)$$

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D} , \quad (16)$$

$$Sh = 2,5N_{Re}^{\frac{1}{2}} \left[N_{Sc} \left(\frac{2h}{L} \right) \delta \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (17)$$

$$R_S = k_m (C_s - \bar{C}) \rho, \quad (18)$$

onde, d é o diâmetro da tubulação, V é a velocidade do fluido no canal, ρ é a densidade da partícula, μ é a viscosidade do fluido, k_m é o coeficiente de transferência de massa, D é coeficiente de difusão, h é a altura da abertura onde é posicionado o bloco de sal, L é o comprimento do bloco de sal, δ é a relação da taxa de cisalhamento na parede de um fluido não newtoniano para newtoniano, R_S é a taxa de dissolução de sal por unidade de área, C_s é a concentração de saturação de sal no fluido e \bar{C} é a concentração do fluido.

O estudo conclui que a taxa de dissolução de sal nos fluidos de perfuração estudados foi inferior ao 5% e esta pode ser determinada através do cálculo dos números adimensionais propostos com desvios de 30% para temperaturas até 464 K.

Outro estudo referente à cinética de dissolução de sais foi desenvolvido por Alkattan *et al.* (1997). Neste trabalho avaliou-se a taxa de dissolução de NaCl em uma solução de NaCl e água deionizada, com concentração inicial de 300 g/L de NaCl. Diferentes temperaturas (25, 50 e 80 °C) foram utilizadas para determinar a influência da temperatura no fenômeno de dissolução de sais. Utilizou-se a técnica de disco rotatório, onde um disco de pó de NaCl comprimido de elevada pureza, era colocado em um suporte rotatório, que era imerso dentro de um reator de parede dupla. A taxa de dissolução era avaliada pela passagem do disco de sal uma vez finalizado o processo. A unidade experimental utilizada neste trabalho pode ser vista na Figura 9.

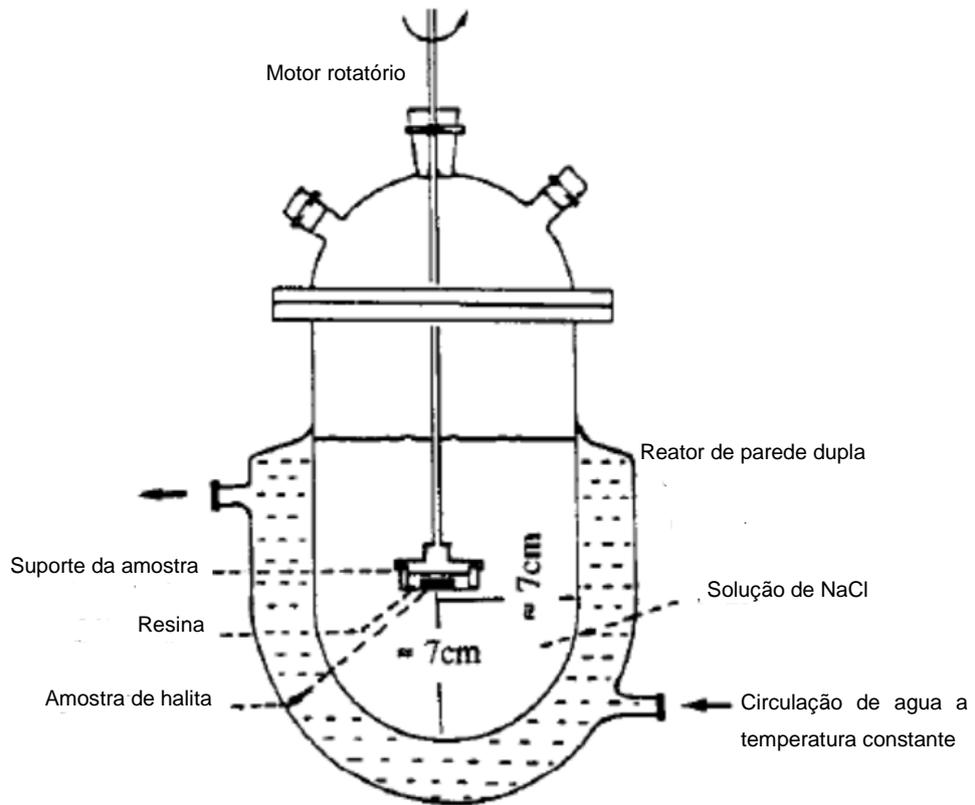


Figura 9 – Esquema da unidade experimental utilizada ppr Alkattan *et al.* (1997).
 Fonte: Adaptado de Alkattan *et al.* (1997).

A abordagem matemática baseia-se na variação da massa dissolvida para cada ion de NaCl em função do tempo, o modelo utilizado é apresentado a seguir:

$$\left(\frac{dm_{Na^+}}{dt}\right) = \left(\frac{dm_{Cl^-}}{dt}\right) = K_t(C_{sat} - C^*) , \quad (19)$$

$$K_t = \frac{D_{AB}}{\delta} , \quad (20)$$

onde, C_{sat} é a concentração de saturação da cloreto de sodio, C^* é a concentração instantânea da cloreto de sodio e K_t é o coeficiente de transferência de massa, D_{AB} é o coeficiente de difusão e δ coeficiente de camada limite. Os resultados obtidos neste trabalho podem ser vistos na Tabela 7.

T °C	rpm	Taxa de dissolução (mol/m ² · s)	K · 10 ⁴ (m/s)
	10	3,56 · 10 ⁻³	
25	500	2,01 · 10 ⁻²	5,0
	1000	2,67 · 10 ⁻²	
50	10	5,26 · 10 ⁻³	2,1
	500	2,81 · 10 ⁻²	
	1000	5,05 · 10 ⁻²	
80	10	9,71 · 10 ⁻³	1,2
	1000	4,16 · 10 ⁻³	
	2000	1,24 · 10 ⁻³	

Tabela 7 – Coeficientes globais de transferência de massa estimados por Alkattan *et al.* (1997).

Fonte: Adaptado de Alkattan *et al.* (1997).

Os autores concluíram que as baixas taxas de dissolução foram devido à elevada concentração inicial da solução (300 g/L de NaCl).

Com o objetivo de ampliar o conhecimento sobre a cinética da dissolução de sal em fluidos de perfuração, desde 2011, vêm-se realizando trabalhos sobre o tema no Laboratório de Escoamento de Fluidos Giulio Massarani, da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Magalhães *et al.* (2011) realizaram o estudo da determinação do coeficiente de transferência de massa do cloreto de sódio em água em taque de mistura. O estudo baseou-se na abordagem matemática desenvolvida por Aksel'rud *et al.* (1992). No trabalho foi determinado o coeficiente de transferência de massa em função da variação da concentração da solução com o tempo, a equação utilizada é representada pela equação (21).

$$\frac{dC}{dt} = \frac{K \cdot A_p (C^* - C)}{V}, \quad (21)$$

onde, C é a concentração instantânea de cloreto de sódio na solução, t é o tempo, K é o coeficiente de transferência de massa, A_p é a área superficial para uma população de sólidos, C^* é a concentração de saturação e V é o volume da solução.

Para a determinação da área superficial, propuseram uma equação, que ao invés de usar a massa da partícula, utilize a massa total da população através da equação (22). Para o cálculo do número de partículas foi utilizada a equação (23).

$$A = \frac{\pi N_p}{\phi} \left(\frac{6(m_p - V(C - C_i))}{\rho_s \cdot \pi \cdot N_p} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (22)$$

$$N_p = \frac{6m_p}{\rho_p \cdot \pi \cdot dp^3}, \quad (23)$$

onde, A é a área superficial da população, N_p é o número de partículas da população, ϕ é a esfericidade da partícula, m_p é a massa total da população, V é o volume total da solução e ρ_s é a densidade do sólido.

Os autores avaliaram a influência da temperatura e da agitação e concluíram que o valor do coeficiente de transferência de massa é maior em maiores temperaturas e elevada agitação como pode ser visto na Tabela 8.

Experimento	Temperatura (K)	Agitação (RPM)	$K \cdot 10^5$ (m/s)
1	333	383	3,45
2	333	479	6,98
3	333	574	8,94
4	318	383	2,32
5	318	479	4,10
6	318	574	5,28
7	303	383	1,55
8	303	479	2,52
9	303	574	4,56

Tabela 8 – Coeficiente de transferência de massa obtidos por Magalhães *et al.* (2011).
Fonte: Magalhães *et al.* (2011).

Patrão (2012) e Martins (2014) também estudaram a dissolução de partículas de NaCl em salmoura em diferentes concentrações. O processo de dissolução de NaCl foi avaliado em uma unidade experimental onde o fluido estudado escoava

através de um sistema de calhas abertas de 29 metros de extensão, como pode ser visto na Figura 10. O sólido era adicionado ao início do escoamento e amostras de fluido eram coletadas em diferentes posições para avaliar a variação da concentração do fluido em função da posição e do tempo.

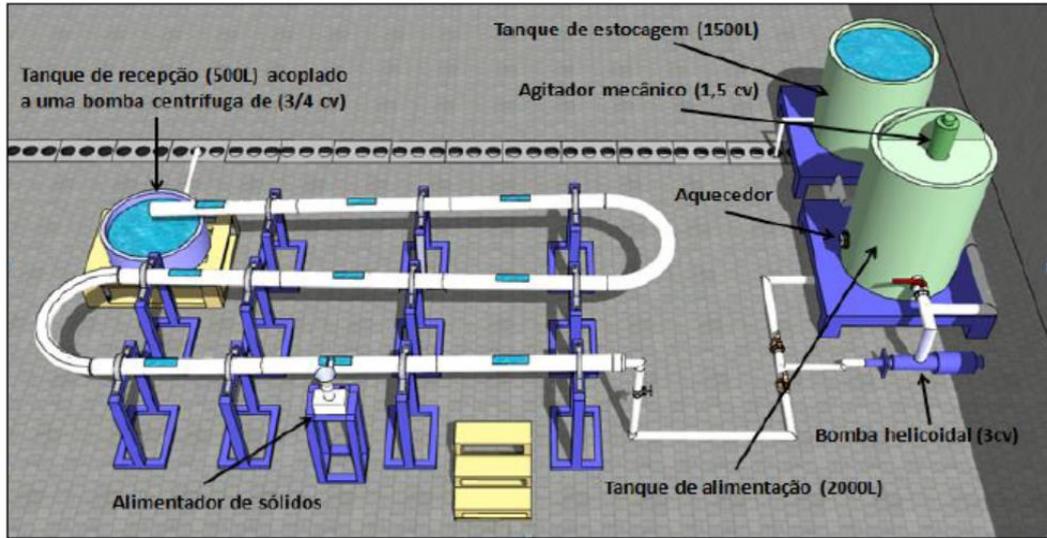


Figura 10 – Esquema da unidade experimental de Patrão (2012) e Martins (2014).
Fonte: Martins (2011).

A abordagem matemática de ambos autores consiste em duas equações diferenciais que baseiam-se na conservação de massa tanto para a fase líquida como para a fase sólida.

$$\frac{\partial}{\partial t} C(z, t) + \bar{v}_z \left(\frac{\partial}{\partial z} C(z, t) \right) = Ka(C^* - C(z, t)) , \quad (24)$$

$$\rho_s \left(\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_s(z, t) + \bar{v}_z \left(\frac{\partial}{\partial z} \varepsilon_s(z, t) \right) \right) = -Ka(C^* - C(z, t)) , \quad (25)$$

onde, C é a concentração de sal solubilizado no fluido, \bar{v}_z é a velocidade média da solução, K é o coeficiente convectivo de transferência de massa, a é a área específica de transferência de massa, C^* é a concentração de saturação, ρ_s é a massa específica de sal e ε_s é a fração volumétrica de sólidos.

Patrão (2012) determinou o coeficiente de transferência de massa para uma única concentração de salmoura de $32 \frac{g}{L}$. O autor encontrou para K o valor de $5,44 \cdot 10^{-4} \frac{m}{s}$, onde a dissolução ocorre mais rapidamente nos primeiros metros percorridos pela salmoura. Os perfis de concentração gerados no trabalho são apresentados na Figura 11.

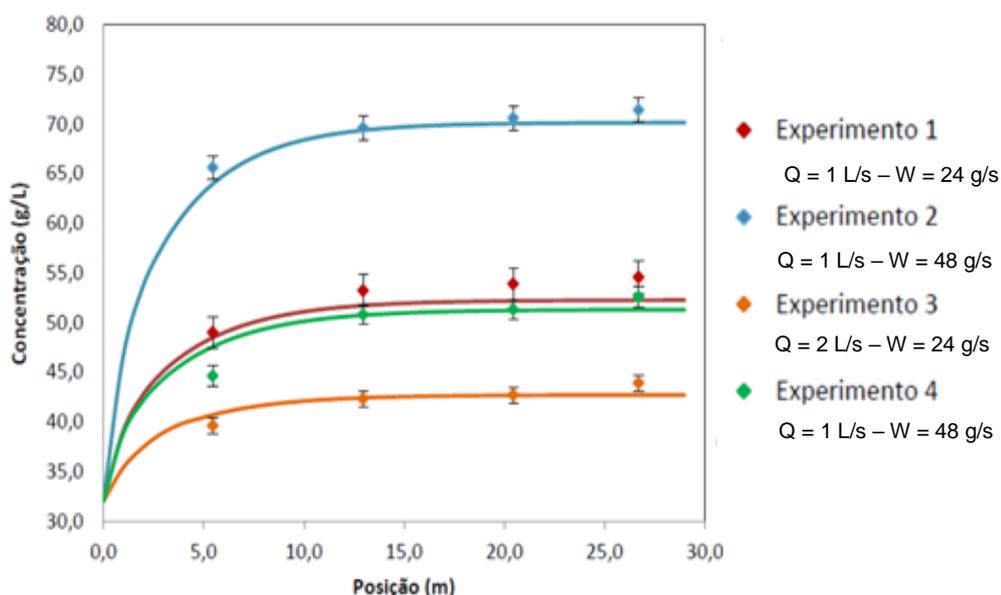


Figura 11 – Perfis de concentração de NaCl em função da posição.
Fonte: Adaptado de Patrão (2012).

Martins (2014) utilizou salmouras com diferentes concentrações iniciais de sal (32, 90, 175 e 258 g/L) e observou que a dissolução de sal ocorre mais rapidamente nos primeiros metros de escoamento e que quanto maior é a concentração de salmoura, mais lenta é a dissolução devido à redução da força motriz do processo. O autor estabeleceu uma equação que correlaciona o coeficiente de transferência de massa com a concentração de salmoura, a equação é apresentada a seguir:

$$K = 0.00489(C)^{-0,639} \quad (26)$$

A Figura 12 mostra o coeficiente de transferência de massa em função da concentração de NaCl da fase líquida obtida por Martins (2014).

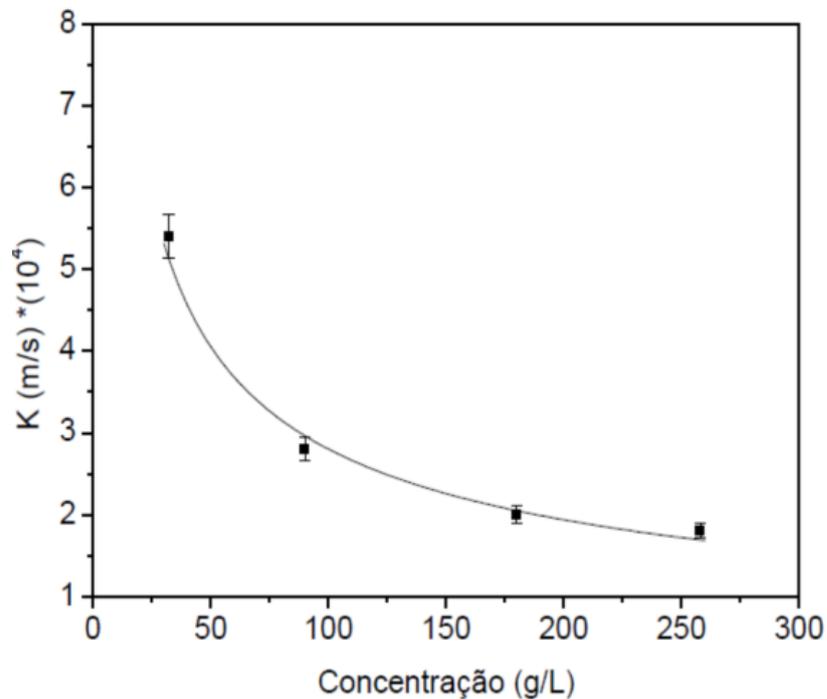


Figura 12 – K em função da concentração da fase líquida.
 Fonte: Martins (2014).

Na sequência, Meneses (2016) investigou a cinética de dissolução de partículas de NaCl em fluidos não-newtonianos na configuração de tanque agitado. Os fluidos empregados foram soluções de goma xantana e NaCl em diferentes concentrações. Este trabalho utiliza a mesma abordagem matemática utilizada por Patrão (2012) e Martins (2014). Como o trabalho foi realizado em tanque agitado, os termos de variação no espaço das equações (24) e (25) foram negligenciados. Diferentemente dos trabalhos citados, este considera a variação do tamanho das partículas de NaCl em função do tempo, esta variação é calculada através da seguinte equação:

$$\frac{dd_p(t)}{dt} = \frac{-2K}{\rho_s} (C^* - C(t)) , \quad (27)$$

onde, d_p é o diâmetro médio de Sauter, t é o tempo, K é o coeficiente de transferência de massa, ρ_s é a densidade do fluido, C^* é a concentração de saturação e C é a concentração em função do tempo.

O autor conclui que a adição de partículas de NaCl nas soluções de goma xantana provoca um aumento na viscosidade aparente da suspensão. A relação entre a concentração de partículas suspensas e a viscosidade aparente é diretamente proporcional. Além disso, verificou que o coeficiente global de transferência de massa diminui a medida que a concentração de goma xantana e NaCl aumentam como pode ser visto na Tabela 9.

Experimentos	C_{GX} (lb/bbl)	C_{i NaCl} (g/L)	K·10⁴ (m/s)
1	0	32	1,110 ± 0,130
2	0,2	32	0,865 ± 0,049
3	0,6	32	0,785 ± 0,051
4	1	32	0,635 ± 0,053
5	0	65	0,950 ± 0,090
6	0,2	65	0,838 ± 0,043
7	0,6	65	0,749 ± 0,051
8	1	65	0,629 ± 0,051
9	0	98	0,836 ± 0,092
10	0,2	98	0,712 ± 0,029
11	0,6	98	0,606 ± 0,029
12	1	98	0,526 ± 0,027

Tabela 9 – Valores estimados para os coeficientes de transferência de massa. Fonte: Meneses (2016).

Carvalho (2017) realizou testes de bancada em um recipiente sobre agitação mecânica para observar a cinética de dissolução de NaCl em fluidos viscosificados com bentonita em diferentes concentrações. Neste trabalho, leituras de condutividade foram utilizadas para fornecer dados de concentração da NaCl no fluido e para avaliar o fenômeno de dissolução. A abordagem matemática empregada no trabalho foi a mesma utilizada por Meneses (2016). Os resultados de Carvalho (2017) são apresentados na Tabela 10.

Experimentos	C_{Bent} (lb/bbl)	C_i (NaCl)	k·10⁴ (m/s)
1	10	32	0,792 ± 0,026
2	10	96	0,609 ± 0,009
3	10	180	0,391 ± 0,023
4	15	96	0,575 ± 0,011
5	15	180	0,327 ± 0,030
6	20	96	0,493 ± 0,023
7	20	180	0,250 ± 0,015

Tabela 10 – Valores estimados para os coeficientes de transferência de massa. Fonte: Adaptado de Carvalho (2017).

Através dos resultados de cinética de dissolução obtidos, o estudo concluiu que a dissolução de NaCl será menor quanto maiores sejam as concentrações de bentonita e NaCl, observou-se que a elevadas concentrações de NaCl existe um acréscimo da viscosidade, este fenômeno afeta a dissolução das partículas de NaCl.

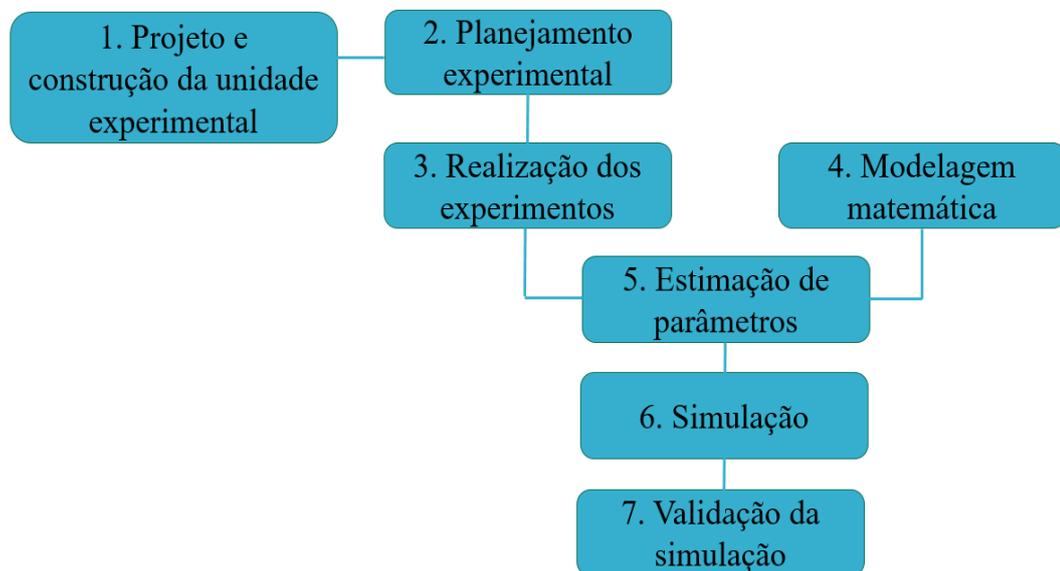
Dando continuidade à linha de pesquisa de dissolução de sais em fluidos de perfuração, o presente trabalho pretende avaliar a cinética de dissolução de NaCl em salmouras com diferentes concentrações em uma nova unidade experimental que opera a condições semelhantes às condições de operação de perfuração de poços de petróleo na região do pré-sal, como número de Reynolds semelhante, escoamento ascendente em tubo vertical do fluido e movimentação das partículas sólidas juntamente com o fluido.

CAPITULO III

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo abordará os materiais e equipamentos que foram utilizados para a realização da parte experimental, assim como a modelagem matemática utilizada para a estimação de parâmetros e validação dos modelos matemáticos.

A metodologia utilizada para este estudo é representada no fluxograma descrito na Figura 13.



1.

Figura 13 – Fluxograma da metodologia empregada.

A metodologia utilizada começou com o projeto e construção de uma unidade experimental que permitiu estudar o fenômeno de dissolução de sais no escoamento ascendente em tubo (1). Com os objetivos determinados, foi definido o planejamento experimental (2) com a finalidade de gerar dados de perfil de concentração dos experimentos realizados (3). Um grupo destes experimentos foram utilizados para a estimação do coeficiente de transferência de massa (5).

A estimação do coeficiente de transferência de massa (5) foi realizada a partir da modelagem matemática (4) composta por 2 equações diferenciais que representam o fenômeno de dissolução de sais para a unidade desenhada. A resolução destas equações foi feita através de um programa computacional (6)

utilizando a linguagem FORTRAN. Os valores estimados foram comparados com os resultados experimentais para determinar a confiabilidade dos parâmetros estimados. O processo final da metodologia empregada foi a validação do modelo desenvolvido (7) utilizando dados experimentais não utilizados para a estimativa de parâmetros.

3.1 Abordagem experimental

Para estudar o fenômeno de dissolução de partículas de NaCl em salmoura no escoamento em tubo foi projetada e construída uma unidade experimental nas instalações do Laboratório de Escoamento de Fluidos Giulio Massarani, da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. A unidade experimental procurou reproduzir condições semelhantes às de operação de perfuração de poços quando se atravessa a camada salina. Neste sentido, trabalhou-se com número de Reynolds semelhante, escoamento vertical ascendente do fluido e escoamento das partículas de NaCl juntamente com o fluido. Um esquema simplificado da unidade experimental é apresentado na Figura 14 e uma foto real da unidade é apresentada na Figura 15.

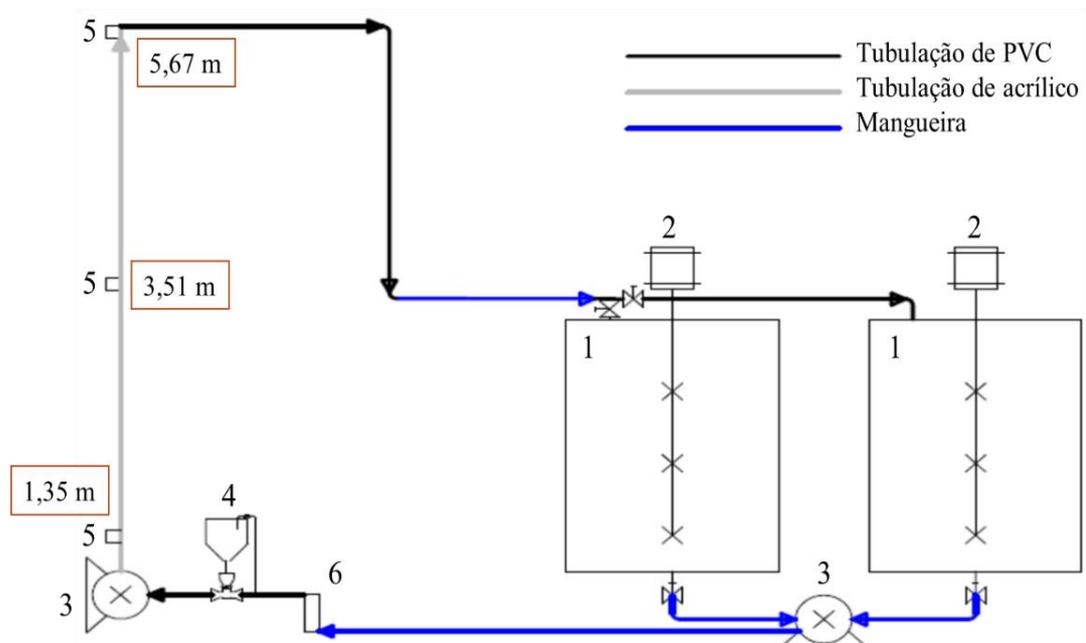


Figura 14 – Esquema simplificado da unidade experimental de dissolução de sal. Onde: 1. Tanque de armazenamento de fluido; 2. Agitador mecânico; 3. Bomba de deslocamento positivo; 4. Sistema de adição de sólidos; 5. Medidor de condutividade; 6. Rotâmetro.



Figura 15 – Foto da unidade experimental.

A unidade experimental era composta por dois tanques de armazenamento (1), cada um com um agitador mecânico (2). O fluido encontrava-se armazenado em um dos tanques enquanto o outro tanque permanecia vazio. O fluido era bombeado por uma bomba de deslocamento positivo (3) em direção ao sistema de alimentação de sólidos (4) onde as partículas de NaCl eram adicionadas ao fluido que estava escoando por um sistema Venturi. Uma segunda bomba de deslocamento positivo (3), bombeava o fluido que passa pelo sistema de alimentação de sólidos (4) para uma tubulação de acrílico de 4 metros de comprimento e diâmetro nominal de 2", em posição vertical fixada em uma torre de suporte. Ao longo da tubulação de acrílico foram instalados 3 medidores de condutividade (5) da marca Metler Toledo, modelo SevenCompact S230 para realizar a leitura dos dados experimentais. As distâncias escolhidas foram 1,35; 3,51 e 5,67 (m) a partir do contato do sólido com o fluido. Estas posições foram escolhidas para cobrir a maior faixa possível de escoamento no trecho vertical. Uma vez que o fluido passava pelo último ponto de medição, este continuava escoando por um conjunto de tubulações de PVC e mangueira até chegar no outro tanque de armazenamento e era estocado para futuros testes ou era descartado. A tubulação de acrílico pode ser vista na Figura 16.



Figura 16 – Tubulação de acrílico.

Os perfis de concentração de salmoura foram obtidos através da leitura, ao longo da tubulação, a partir dos dados de condutividade, estes foram transformados em concentração com a ajuda de uma curva de calibração previamente realizada.

3.1.1 Montagem da unidade experimental.

Construiu-se uma torre de suporte capaz de segurar a tubulação de acrílico na posição vertical que permitiu a coleta de dados em diferentes alturas. A torre de suporte tinha 6,80 metros de altura com patamares onde os pesquisadores podiam se posicionar durante os experimentos, a cada 1,96 metros e contava com uma escada que permitia subir à patamares superiores. Pontos de ancoragem para cintos de segurança foram instalados ao longo da torre de suporte.

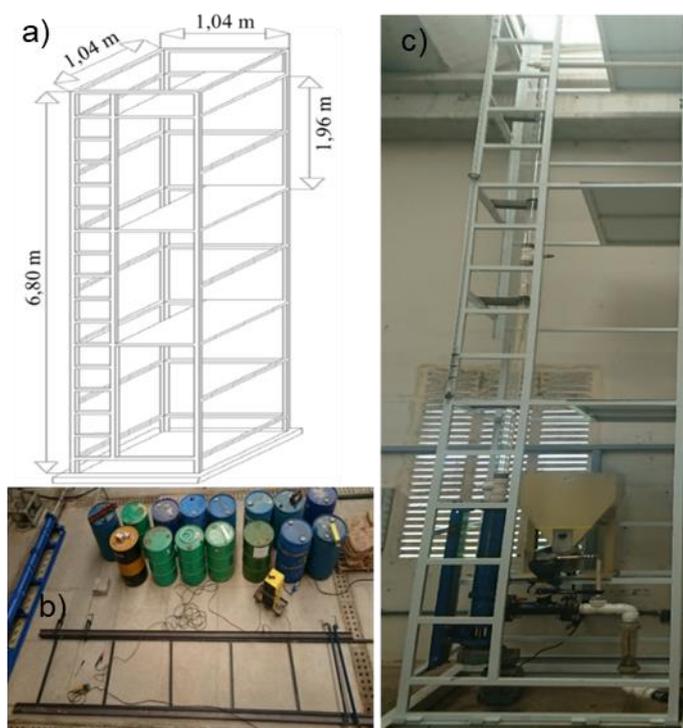


Figura 17 – a) Esquema da torre de suporte; b) Construção da torre de suporte; c) Disposição final da torre de suporte.

Dois tanques de armazenamento cada um de $3,2 \text{ m}^3$ de capacidade foram posicionados na área de estudo. Agitadores mecânicos foram instalados para garantir a dissolução das partículas de NaCl durante o preparo das salmouras.

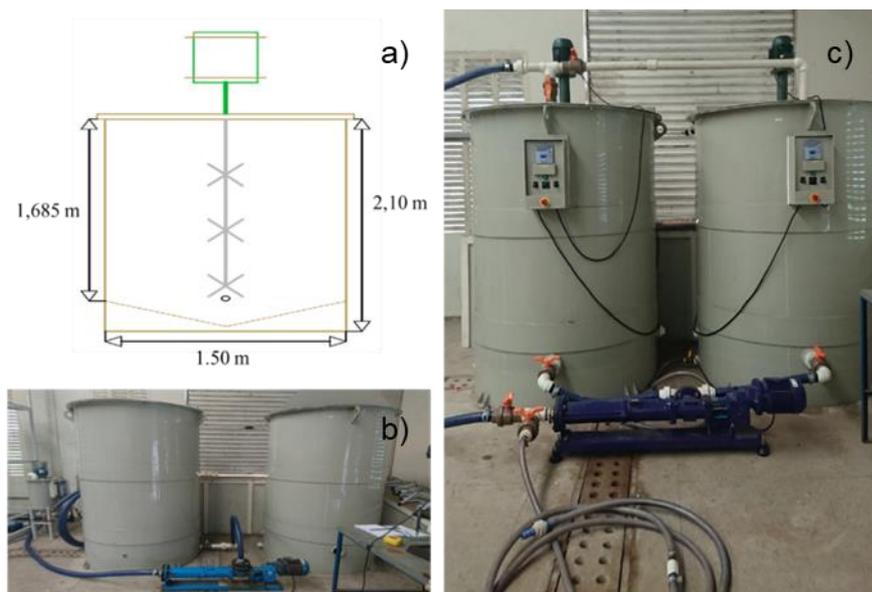


Figura 18 – a) Desenho dos tanques de armazenamento de fluido; b) Montagem dos tanques; c) Disposição final dos tanques de armazenamento de fluido.

Foram utilizadas duas bombas de deslocamento positivo. A primeira bomba, foi posicionada na saída dos tanques de armazenamento (Figura 19). Saindo do tanque o fluido era bombeado até o sistema de adição de sólidos. Esta bomba também permitia o descarte do fluido. Um conjunto de válvulas possibilita direcionar o fluido para a unidade experimental ou para o descarte.



Figura 19 – Bomba posicionada na saída dos tanques de armazenamento.

A segunda bomba (Figura 20) foi posicionada na saída do sistema de adição de sólidos. Esta bomba era a responsável pela sucção do fluido quando este escoava através da tubulação de efeito Venturi e o bombeava através da tubulação de acrílico até o tanque de armazenamento.



Figura 20 – Bomba posicionada na saída do sistema de adição de sólidos.

3.1.2 Sistema de adição de sólidos

Para realizar a adição de partículas de NaCl no fluido em escoamento, foi projetado um sistema que opera com o princípio do efeito Venturi.

A Figura 21 representa um esquema simplificado do sistema de adição de sólidos e a Figura 22 é uma foto real do sistema.

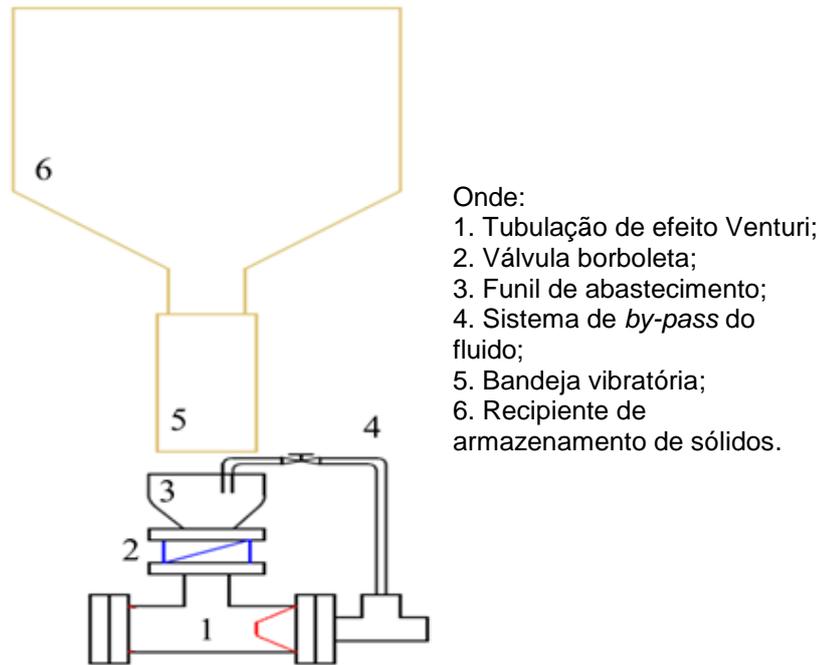


Figura 21 – Esquema simplificado do sistema de adição de sólidos.



Figura 22 – Foto do sistema de adição de sólidos.

O sólido foi carregado no recipiente de armazenamento do equipamento, momentos antes do início do experimento para evitar contaminação das amostras. Uma bandeja vibratória (modelo F.010 adquirida da empresa MVL – Vibradores industriais Ltda.) provocou a movimentação do sólido, até o funil de abastecimento. A bandeja vibratória foi acionada por um quadro de comando que regula a intensidade da vibração, controlando, assim, a vazão mássica. Na Figura 23 podem ser vistos os equipamentos descritos.

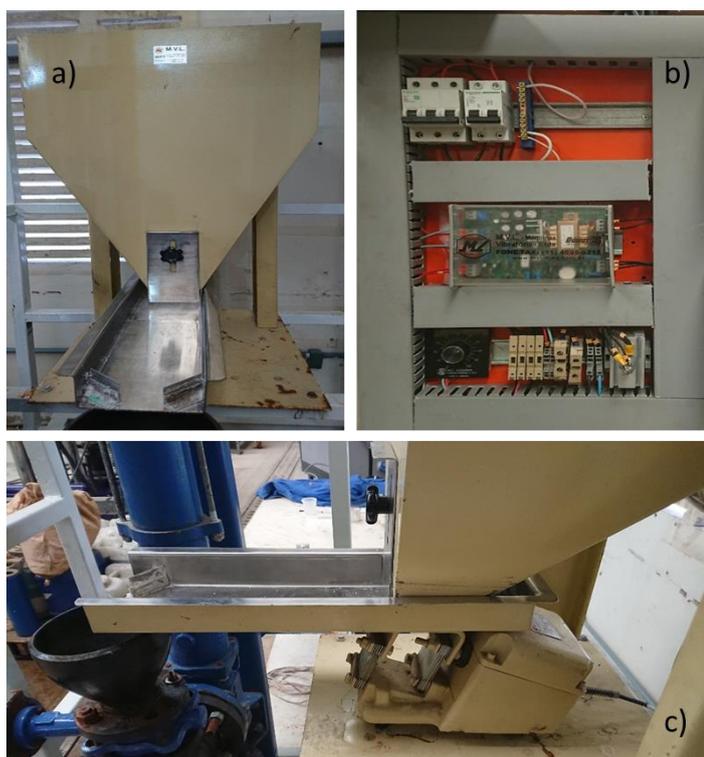


Figura 23 – a) Recipiente de armazenamento de sólidos; b) Quadro de comando; c) bandeja vibratória.

Uma vez que o sólido atingia o final da bandeja vibratória, este caía dentro de um funil de abastecimento onde entrava em contato com o fluido. As partículas eram sugadas devido à queda de pressão ocasionada pela diminuição da área de escoamento (efeito Venturi).

A vazão mássica de sólidos foi determinada por meio da calibração da intensidade de vibração da bandeja vibratória, que era realizada antes de cada experimento. Para isto, uma quantidade conhecida de NaCl era carregada ao sistema e se avaliava o tempo em que o recipiente era esvaziado.

Um sistema de *by-pass* foi adicionado na entrada da tubulação de efeito Venturi com a finalidade de que parte do fluido que estava escoando fosse direcionado para o funil de abastecimento através de uma tubulação de diâmetro menor para realizar uma lavagem nas paredes deste e evitar que partículas de sólido fiquem aglomeradas na parede do funil.

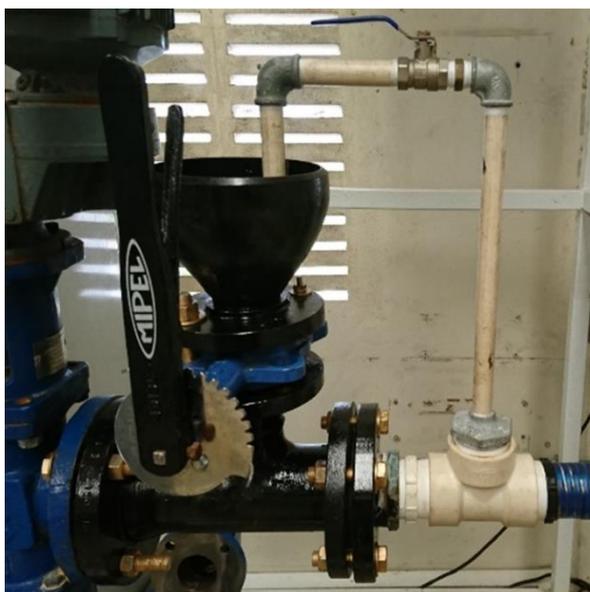


Figura 24 – Tubulação de efeito Venturi e sistema de *by pass*.

3.1.3 Caracterização das amostras de NaCl

A halita ou cloreto de sódio (NaCl) é o principal constituinte da camada salina do pré-sal, é por este motivo que decidiu-se empregar este sal para a realização deste trabalho. Utilizou-se sal grosso que foi adquirido da empresa Cisne para a realização dos experimentos.



Figura 25 – Amostras de NaCl.

Foi realizada uma análise granulométrica das amostras para determinar o diâmetro médio de Sauter. Para realizar este procedimento, utilizou-se um conjunto de peneiras vibratórias (Figura 26), de diferente *mesh* (diâmetro de abertura de cada peneira), foram utilizadas as peneiras de *mesh* 4, 6, 16, 30 e 48.



Figura 26 – Conjunto de peneiras e sistema vibratório.

Uma vez finalizado o processo de peneiramento, a massa de NaCl retida em cada peneira era pesada e em seguida procedia-se o cálculo do diâmetro médio de Sauter. Segundo Massarani (2001), este parâmetro pode ser calculado utilizando a equação 28.



Figura 27 – Foto das peneiras com amostras de sal.

$$\bar{D}_p = \frac{1}{\int_0^1 \frac{dx}{D_i}} \cong \frac{1}{\sum_i \frac{\Delta x_i}{D_i}}, \quad (28)$$

onde, \bar{D}_p é o diâmetro médio de Sauter, x e x_i são a fração mássica de sal e fração mássica retida em cada peneira.

As amostras de NaCl utilizadas nos experimentos eram colocadas no recipiente de armazenamento do sistema de adição de sólidos momentos antes da realização dos experimentos como pode ser visto na Figura 28.



Figura 28 – Abastecimento de NaCl ao sistema de adição de sólidos.

A determinação da densidade das partículas de NaCl foi feita por picnometria. Utilizou-se um picnômetro de 100ml (Figura 29), onde se aferiu a massa do picnômetro vazio, introduziu-se uma massa conhecida de partículas de NaCl e adicionou-se um parafina líquida ($\rho = 0,81 \frac{g}{cm^3}$) até encher o picnômetro e procedeu-se a pesagem. Com o valor da massa total calculou-se a massa da parafina e conseqüentemente o volume da mesma, subtraindo este volume do volume total é que determinou-se o valor do volume de NaCl, como o valor da massa de NaCl era conhecido, a densidade das partículas de NaCl foi calculada através da relação entre a massa e o volume. Utilizou-se parafina devido à insolubilidade das partículas de NaCl neste fluido.

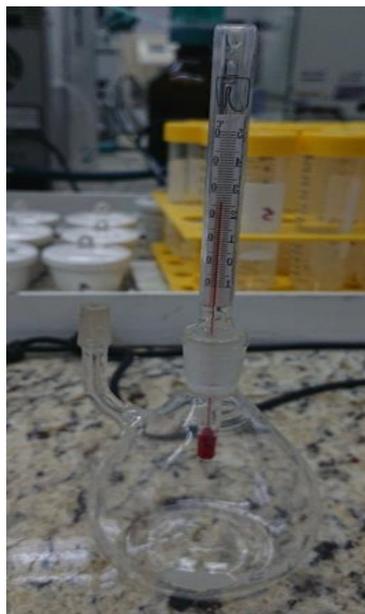


Figura 29 – Picnômetro utilizado para determinar a densidade do sal.

3.1.4 Determinação da concentração de NaCl.

A determinação das concentrações de NaCl iniciais e durante os experimentos foi feita por meio de leituras de três condutivímetros em pontos pré-determinados ao longo da tubulação de acrílico. Eram lidos valores de condutividade a cada segundo, estes valores de condutividade adquiridos em cada ponto de medição, foram convertidos em concentração com a ajuda de curvas de calibração previamente construídas.

Para a construção das curvas de calibração foi utilizada uma unidade de bancada, que pode ser vista nas Figuras 30 e 31, onde massas conhecidas de NaCl eram adicionadas a 1 L de água até a saturação do fluido, procedia-se a leitura da condutividade para cada concentração conhecida. Com os valores de condutividade em função da concentração de NaCl foi possível traçar uma curva de ajuste para estes pontos. A partir desta curva, pode-se determinar o valor da concentração para qualquer valor de condutividade que estivesse dentro faixa da curva de ajuste. Devido à dependência do valor da condutividade com a temperatura, utilizou-se um banho térmico durante os testes para manter a temperatura do sistema. Foram realizadas curvas de calibração para as temperaturas de 25, 30 e 35°C. Um agitador mecânico foi acoplado para garantir a completa dissolução das partículas de sal no fluido.

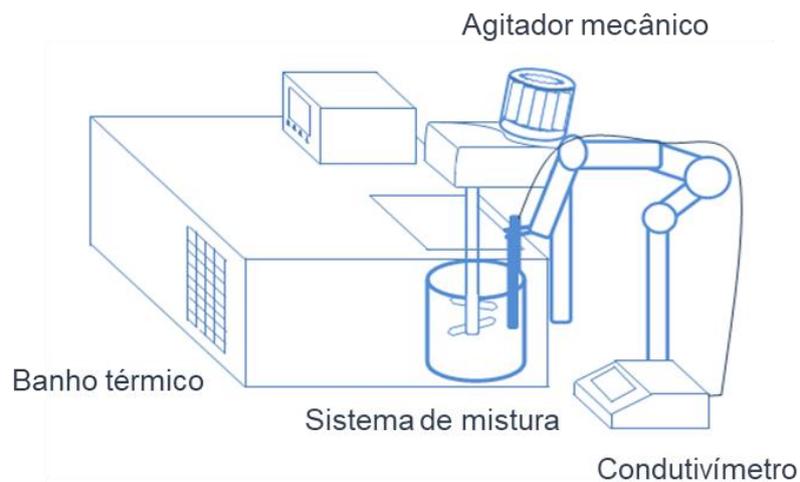


Figura 30 – Esquema da unidade de bancada utilizada para a construção das curvas de calibração.

Fonte: Adaptado de Carvalho (2017).



Figura 31 – Unidade de bancada utilizada para a construção das curvas de calibração.

As leituras de condutividade na unidade experimental foram realizadas por 3 condutivímetros da marca Metler Toledo, modelo SevenCompact S230. Este equipamento permitiu ler valores de condutividade entre $0,001 \mu S/cm$ a $1000 mS/cm$ com uma precisão de $\pm 5\%$, além de ter incorporado um sensor que permite a leitura da temperatura. Os condutivímetros utilizados neste trabalho podem ser vistos na Figura 32.



Figura 32 – Condutivímetros Metler Toledo SevenCompact S230.

Na Figura 33 pode-se visualizar o condutivímetro posicionado no primeiro ponto de aquisição de dados da unidade experimental.



Figura 33 – Eletrodo posicionado na unidade experimental.

3.1.5 Controle da vazão volumétrica de salmoura

A vazão volumétrica foi controlada por dois inversores de frequência, cada um controlando uma bomba. Deste modo foi possível controlar a vazão volumétrica de salmoura que entra na unidade através da interface dos inversores de frequência.



Figura 34 – Quadro dos inversores de frequência.

Para realizar a medição da vazão volumétrica foi utilizado um rotâmetro, com leitura direta (Figura 35), modelo BLI-5000 PP-PP adquirido da empresa Blaster Controles. Este equipamento opera dentro de uma faixa de 1 a 10 L/s, a uma temperatura máxima de 50°C e pressão máxima de $6 \frac{kgf}{cm^2}$.

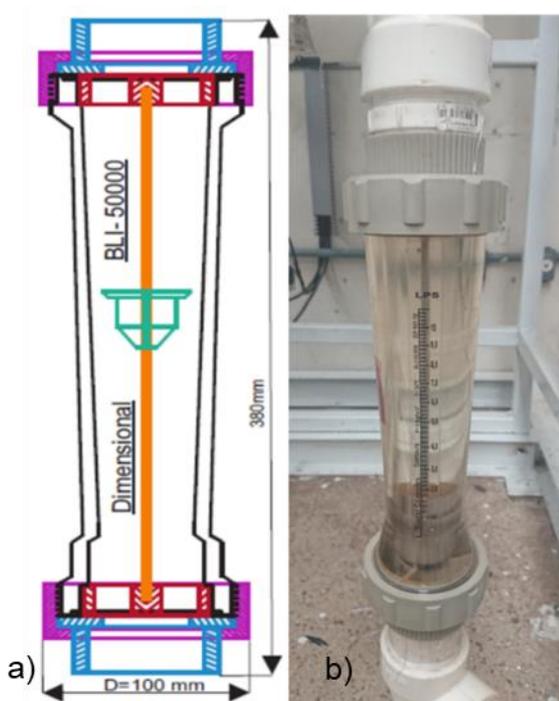


Figura 35 – a) Esquema do rotâmetro b) Foto de rotâmetro utilizado.

3.1.6 Planejamento experimental

Desenvolveu-se um planejamento fatorial para a obtenção dos dados de perfil de concentração de salmoura para diferentes concentrações iniciais de NaCl. Foram utilizadas duas variáveis, vazão volumétrica de fluido (Q) e a vazão mássica de sólido (W). Foram utilizados 3 níveis para cada vazão, mínimo ($Q_1 = 1$ L/s e $W_1 = 32$ g/s), central ($Q_2 = 1,5$ L/s e $W_2 = 48$ g/s) e máximo ($Q_3 = 2$ L/s e $W_3 = 64$ g/s). Os experimentos foram realizados em triplicata para a avaliação do erro experimental.

A Tabela 11 mostra a malha experimental proposta, onde os experimentos 1 ao 9 foram utilizados para realizar a estimativa do coeficiente global de transferência de massa e os experimentos 10 ao 15 foram utilizados para realizar a validação do modelo matemático.

Experimento	$C_o \left(\frac{g}{l}\right)$	$Q \left(\frac{L}{s}\right)$	$w \left(\frac{g}{s}\right)$
1	0	Q_1	W_1
2	32	Q_1	W_1
3	64	Q_1	W_1
4	0	Q_2	W_2
5	32	Q_2	W_2
6	64	Q_2	W_2
7	0	Q_3	W_3
8	32	Q_3	W_3
9	64	Q_3	W_3
10	0	Q_3	W_1
11	32	Q_3	W_1
12	64	Q_3	W_1
13	0	Q_1	W_3
14	32	Q_1	W_3
15	64	Q_1	W_3

Tabela 11 – Malha experimental proposta.

3.2 Modelagem matemática.

A modelagem matemática utilizada neste trabalho é composta por duas equações diferenciais parciais (EDP). Estas equações baseiam-se na conservação de massa para a fase líquida (fluido utilizado para o estudo) e na conservação de massa para a fase sólida (partículas sólidas de NaCl) e tem como objetivo calcular as variações de concentração do fluido e fração volumétrica de sólidos ao longo do espaço e do tempo e está baseada na abordagem utilizada por Martins (2014) e Meneses (2016). O modelo é apresentado pelas equações (29) e (30).

$$\frac{\partial}{\partial t} C(z, t) + \bar{v}_z \left(\frac{\partial}{\partial z} C(z, t) \right) = K \cdot a(C^* - C(z, t)) , \quad (29)$$

$$C.I., C(z, 0) = C_f,$$

$$C.I., C(0, t) = C_f$$

$$\rho_s \left(\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_s(z, t) + \bar{v}_z \left(\frac{\partial}{\partial z} \varepsilon_s(z, t) \right) \right) = -K \cdot a(C^* - C(z, t)) , \quad (30)$$

$$C.I., \varepsilon_s(z, 0) = \varepsilon_{s0},$$

$$C.I., \varepsilon_s(0, t) = \varepsilon_{s0}$$

onde, C é a concentração de sal no fluido, \bar{v}_z é a velocidade média da solução, K é o coeficiente global de transferência de massa, a é a área específica de transferência de massa, C^* é a concentração de saturação do fluido e ε_s é a fração volumétrica de sólidos.

Algumas hipóteses foram adotadas para a solução do sistema de equações:

- Variação da concentração em função do tempo e o espaço;
- Escoamento em duas fases:
 - Fase líquida – Solução de água e NaCl;
 - Fase sólida – Partículas sólidas de NaCl.
- Regime transiente;
- Regime turbulento com a velocidade média constante;
- Fluido newtoniano incompressível;

- Sistema isotérmico.

Com relação às equações do modelo, temos que:

- O primeiro termo das duas equações refere-se à variação de concentração e à variação da fração volumétrica de sólidos com o tempo ao longo do escoamento. Este termo é chamado de acúmulo, e por ser um termo diferencial no tempo é diferente de zero durante o regime transiente.
- O segundo termo das duas equações refere-se à transferência de massa por convecção. Este fenômeno ocorre quando o sistema é submetido a algum tipo de deslocamento e depende da velocidade do sistema.
- O terceiro termo das duas equações refere-se ao fenômeno de transferência de massa entre as fases líquida e sólida, que é influenciado pela cinética de dissolução do processo e é representada pelo coeficiente de transferência de massa.
- O sinal negativo presente na equação (30) representa a direção do fluxo durante a dissolução. Como o fluxo ocorre da fase sólida para a fase líquida a concentração de sólido decresce com o tempo, assim a concentração da fase líquida incrementa com o tempo. O coeficiente de transferência de massa (K) está relacionado com a resistência ao fenômeno de dissolução.

A área específica das partículas de NaCl pode ser definida como a área da superfície total para a transferência de massa por unidade de volume e é representada pela seguinte equação:

$$a = \frac{6 \cdot \varepsilon_s(z, t)}{\bar{D}_p} , \quad (31)$$

onde, \bar{D}_p é o diâmetro médio de Sauter.

Neste trabalho, foram realizadas duas abordagens para o cálculo de área específica de transferência de massa (a). A primeira considera que o diâmetro da partícula diminui ao longo do escoamento. Para determinar a variação do diâmetro

das partículas, primeiramente deve-se calcular um número de partículas de sólido que entram no sistema (N_p), segundo Magalhães *et al.* (2011) este pode ser calculado utilizando a seguinte equação.

$$N_p = \frac{6 \cdot m_s}{\rho_p \cdot \pi \cdot \bar{D}_p^3}, \quad (32)$$

onde, N_p é o número de partículas de NaCl, m_s é a massa de sal que entra no sistema, ρ_p é a densidade do NaCl e \bar{D}_p é o diâmetro médio de Sauter.

Assumindo que o número de partículas não varia e que todas as partículas diminuem de tamanho uniformemente, pode-se dizer que o tamanho da partícula depende da massa não dissolvida (m_r), deixando a equação (32) em função de \bar{D}_p , temos a seguinte equação:

$$\bar{D}_p = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot m_r}{\rho_s \cdot \pi \cdot N_p}}, \quad (33)$$

onde, m_r é a massa não dissolvida de NaCl durante o processo de dissolução.

Com o objetivo de avaliar a influência da variação do diâmetro das partículas no processo de dissolução de sais, a segunda abordagem considera o diâmetro das partículas de NaCl constante, como foi considerado nos trabalhos realizados por Patrão (2012) e Martins (2014).

3.2.1 Variáveis do processo.

Para a resolução da modelagem matemática proposta foram utilizadas as condições iniciais descritas na Tabela 12.

Descrição	Parâmetros	Valores	Bibliografia
Concentração de saturação de NaCl em água	C^* (25 °C)	$320 \frac{g}{L}$	Experimental
Massa específica de Na Cl	ρ_s	$2165 \frac{kg}{m^3}$	Experimental
Diâmetro médio de Sauter	\bar{D}_p	$0,00172 m$	Experimental
Fração volumétrica de sólidos inicial	ε_o	$\frac{W_s}{Q \cdot \rho_s}$	Calculado

Tabela 12 – Variáveis de processo.

CAPITULO IV

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Avaliação do Número de Reynolds

Segundo Bird *et al.* (2002), o número de Reynolds é um número adimensional que define a relação entre as forças inercias e as forças viscosas no escoamento de um fluido, podendo ser calculado utilizando a equação (34).

$$R_e = \frac{\rho \cdot \bar{v}_z \cdot D}{\mu}, \quad (34)$$

onde, R_e é o número de Reynolds, ρ é a densidade do fluido, \bar{v}_z é a velocidade média do fluido, D é o diâmetro da seção circular e μ é a viscosidade dinâmica do fluido.

Com o objetivo de avaliar a natureza do escoamento e de realizar um comparativo do tipo de escoamento entre os poços de petróleo e a unidade experimental, avaliou-se o número de Reynolds para ambos casos quando salmoura em diferentes concentrações escoar através destes.

O número de Reynolds dos poços de petróleo no pré-sal depende da configuração geométrica escolhida para perfurar essas zonas e da vazão do fluido a ser bombeado. Na perfuração de poços no pré-sal são utilizadas brocas de diâmetros de $17 \frac{1}{2}$ " , 16 " e $14 \frac{3}{4}$ " , *drill pipes* de 8 " ou 5 " e vazões de fluido de perfuração de 1000, 800 e 500 gpm.

Para avaliar o número de Reynolds dos poços de petróleo serão utilizadas duas configurações geométricas, a primeira utilizando um diâmetro de poço de $17 \frac{1}{2}$ " com *drill pipes* de 8 " e a segunda utilizando o mesmo diâmetro de poço com *drill pipes* de 5 " , as vazões volumétricas para ambos casos serão de 1000, 800 e 500 gpm, o valor de D utilizado na equação (36) será igual ao valor do espaço anular. Os valores típicos do número de Reynolds para os poços de petróleo são apresentados na Tabela 13.

Configuração	Vazão de fluido	Número de Reynolds
17 1/2" – 8"	1000	139.195
	800	111.356
	500	69.597
17 1/2" – 5"	1000	157.754
	800	126.203
	500	78.877

Tabela 13 – Número de Reynolds dos poços de petróleo.

Com os dados apresentados na Tabela 13, pode-se observar que o sistema é plenamente turbulento para a configuração geométrica e vazões escolhidas para a análise.

A Tabela 14 apresenta o cálculo do número de Reynolds para as três vazões experimentais utilizadas ($Q_1 = 1$ L/s, $Q_2 = 1,5$ L/s e $Q_3 = 2$ L/s) e para uma vazão de 5 L/s, que não foi possível atingir tecnicamente na unidade experimental. O valor de D utilizado na unidade experimental é 0,0466 m (diâmetro real da tubulação).

Vazão volumétrica (L/s)	Número de Reynolds
1	30.665
1,5	45.998
2	61.330
5	153.326

Tabela 14 – Número de Reynolds da unidade experimental para diferentes vazões volumétricas.

Pela Tabela 14 pode-se observar que o sistema opera em condições de turbulência. Experimentalmente, a unidade consegue operar com números de Reynolds na ordem de 10^4 , que são valores semelhantes ao do poço quando a vazão é de 500 gpm. O número de Reynolds da vazão de 5 L/s encontra-se na ordem de 10^5 , este valor é semelhante ao número de Reynolds de poço quando se opera com vazões de fluido de 800 e 1000 gpm. Esse valor será simulado no tópico 4.9.2 para comparação.

4.2 Curvas de calibração

A Figura 36 apresenta os dados da curva de calibração da condutividade da salmoura com a concentração, na temperatura de 25 °C. A equação (35), foi ajustada

e permite determinar a concentração de NaCl quando o valor da condutividade é conhecido.

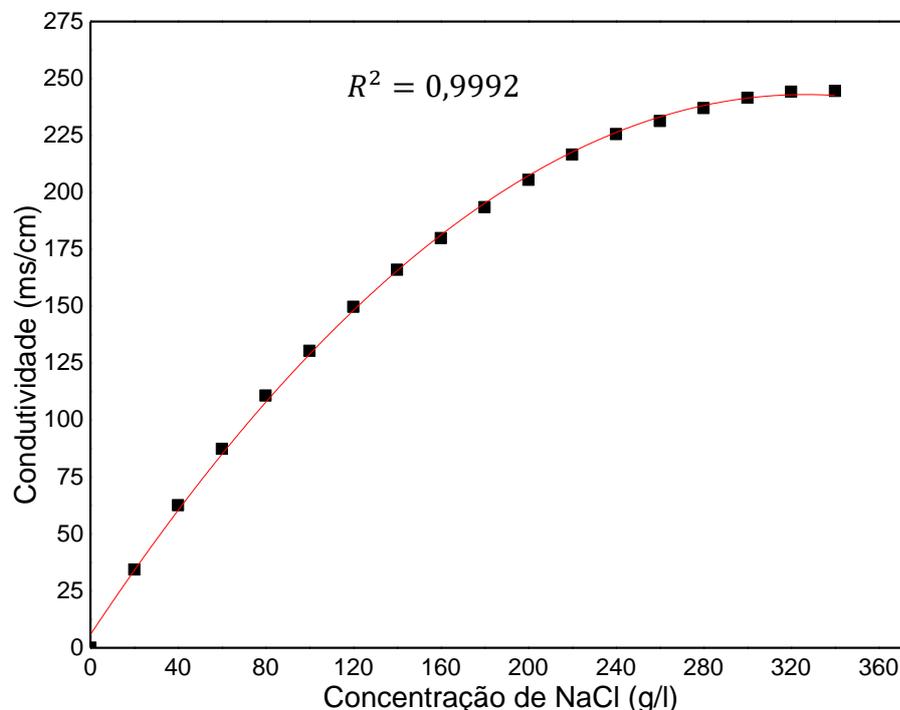


Figura 36 – Curva de calibração para a determinação da concentração de NaCl a 25°C.

$$y = -0,0022x^2 + 1,452x + 5,8405 , \quad (35)$$

onde, y é a condutividade, x é a concentração

Observando a Figura 36 pode-se concluir que o aumento do valor da condutividade é menos influenciado a medida que a concentração de NaCl no fluido aumenta. Em elevadas concentrações de NaCl, as partículas de sal que se dissolvem no fluido têm menor mobilidade, originando assim, maior dificuldade para condução da corrente elétrica. Experimentalmente observou-se que o valor da concentração de saturação é de 320 g/L, isto quer dizer que, a partir desta concentração, o fluido não terá mais capacidade de dissolver sólidos. O valor da condutividade tenderá a diminuir caso sejam adicionados mais sólidos ao sistema, pois as partículas sólidas, que não podem ser dissolvidas, dificultarão a livre movimentação dos íons, diminuindo ainda mais a capacidade para conduzir a corrente elétrica.

4.3 Caraterização das partículas de NaCl.

Foi realizada a análise granulométrica das amostras de sal com a finalidade de verificar a homogeneidade das amostras e determinar o diâmetro médio de Sauter. Foram avaliadas 10 amostras de 1 kg de NaCl. Os resultados da fração mássica retida em cada peneira e o resultado do diâmetro médio de Sauter são apresentados na Tabela 15. A Figura 37 apresenta a distribuição granulométrica. Para o cálculo do diâmetro médio de Sauter foi utilizada a equação (28) apresentada no tópico 3.1.3 deste trabalho.

Diâmetro da peneira (mm)	Fração mássica média retida em cada peneira	Desvio padrão σ
4,75	2,63	0,0238
3,35	6,33	0,0628
1,18	73,77	0,0469
0,59	14,88	0,0469
0,35	1,62	0,0263
0,15	0,77	0,0426
Diâmetro Médio de Sauter (mm)	1,72	0,0415

Tabela 15 – Distribuição granulométrica e diâmetro médio de Sauter amostras avaliadas

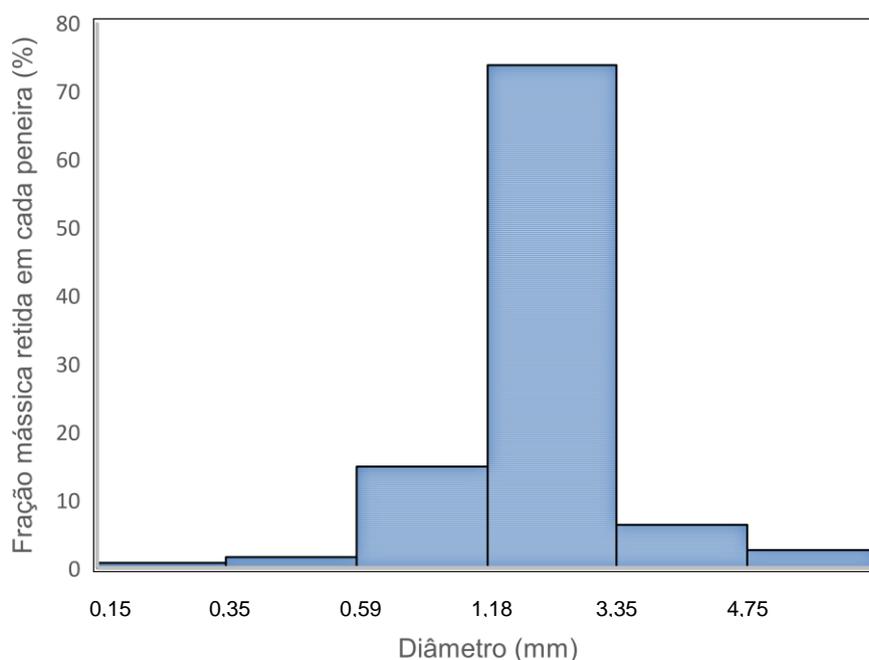


Figura 37 – Distribuição granulométrica das amostras avaliadas.

De acordo com os resultados obtidos 73,77% das partículas de NaCl possuem um diâmetro entre 3,35 e 1,18 mm, 0,77% possuem um diâmetro inferior a 0,15 mm e 2,63% das partículas possuem um diâmetro maior a 4,75 mm.

O diâmetro médio de Sauter calculado para as amostras de NaCl foi de 1,72 mm; resultado semelhante ao encontrado por Patrão (2012) e Martins (2014), que foi de 1,71 mm.

Determinou-se que a densidade das partículas de NaCl utilizadas neste trabalho é de $2,165 \text{ g/cm}^3$. O cálculo completo da densidade de NaCl pode ser visto no Anexo A.

4.4 Resultados Experimentais

A unidade experimental utilizada nos experimentos foi capaz de fornecer dados de concentração em cada ponto de estudo em intervalos de tempo definidos. A coleta de dados foi realizada a cada segundo para os três pontos de medição. O volume de fluido utilizado para cada experimento foi de 600 L, o tempo de escoamento para as vazões volumétricas estudadas Q1; Q2 e Q3 foi de 600, 400 e 300 segundos, obtendo-se assim a mesma quantidade de dados de concentração para cada ponto de estudo.

Os dados experimentais de concentração apresentados nas Tabelas 16, 18 e 20 representam a média aritmética do conjunto de dados obtidos para cada ponto, uma vez que foi atingido o regime permanente.

Com a finalidade de comparar, validar e garantir a repetibilidade dos experimentos, todos foram realizados em triplicata. Os resultados obtidos através dos experimentos realizados na unidade experimental são apresentados e discutidos a seguir.

4.4.1 Concentração de 0 g/L de NaCl

Foram realizados 5 experimentos com concentração inicial de 0 g/L de NaCl (água pura). Os dados experimentais para este grupo de experimentos são apresentados na Tabela 16, onde pode-se observar, como era esperado, que o valor da concentração aumenta ao longo do escoamento. Na Tabela 16, σ é o desvio padrão dos experimentos em triplicata que em sua maioria são inferiores a 10%.

Posição (m)	Concentração de NaCl (g/L)									
	Exp1	σ	Exp4	σ	Exp7	Σ	Exp10	σ	Exp13	σ
1,35	19,04	1,65	10,23	1,16	8,13	1,05	3,20	0,74	27,58	2,33
3,51	22,44	1,87	12,88	1,56	11,96	1,50	4,88	0,99	34,79	2,95
5,67	24,63	1,96	15,22	1,85	14,25	1,65	5,90	1,19	40,12	3,30

Tabela 16 – Dados experimentais para a concentração inicial de 0 g/L de NaCl.

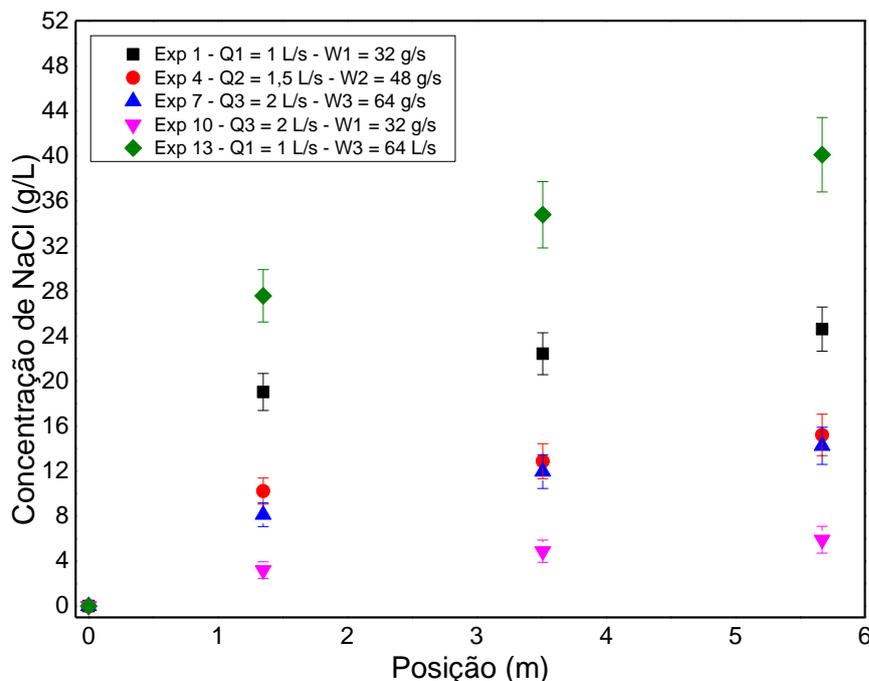


Figura 38 – Concentração de NaCl em função da posição para a concentração inicial de 0 g/L de NaCl.

Realizou-se um balanço de massa (equação 36) para determinar a quantidade massa de NaCl que se dissolveu durante o escoamento.

$$\dot{m}_s = Q \cdot (C_f - C_o) + \dot{m}_r , \quad (36)$$

onde, \dot{m}_s é a taxa de massa de NaCl sólido que entra no sistema, Q é a vazão do fluido, C_f é a concentração de sal dissolvido no fluido, C_o é a concentração de sal inicial no fluido e \dot{m}_r é a massa de NaCl não dissolvido. Os resultados podem ser vistos na Tabela 17.

Avaliando-se a Tabelas 16 e 17 em conjunto com a Figura 38, pode-se perceber que uma das características dos experimentos 1,4 e 7 é que a vazão volumétrica e mássica tem a mesma proporção, entretanto os comportamentos são diferentes. Na

Tabela 17, pode-se observar que no experimento 1, realizado com a menor vazão volumétrica $Q_1 = 1$ L/s e menor vazão mássica $W_1 = 32$ g/s, até o último ponto de medição, 76,96% das partículas de NaCl foram dissolvidas. No experimento 4 $Q_2 = 1,5$ L/s e $W_2 = 48$ g/s, 47,56% dos sólidos adicionados foram dissolvidos e 44,53% no experimento 7, realizado com $Q_3 = 2$ L/s e $W_3 = 64$ g/s.

Exp	Vazão de fluido (L/s)	Massa de entrada (g/s)	Massa dissolvida (g/s)	Massa não dissolvida (g/s)	% Dissolvido
1	1	32	24,63	7,37	76,96
4	1,5	48	22,8	25,2	47,56
7	2	64	28,5	35,5	44,53
10	2	32	11,8	20,2	36,87
13	1	64	40,12	23,88	62,69

Tabela 17 – Resultados do balanço de massa para a concentração de 0 g/L de NaCl.

Analisando estes dados, pode-se dizer que existe uma maior dissolução das partículas de NaCl no fluido quando a vazão volumétrica é menor, visto que o tempo de residência da partícula será maior, originando assim um maior tempo de contato do sólido com o fluido. Nos experimentos 4 e 7, realizados com maiores vazões volumétricas, pode-se observar que as taxas de dissolução foram menores, devido ao menor tempo de residência da partícula. Destes 3 experimentos, os experimentos 4 e 7 apresentam perfis de concentração semelhantes, isto por conta da menor variação na velocidade do fluido entre estes dois experimentos. A velocidade do fluido para a vazão volumétrica de 1,5 L/s é de 0,87 m/s, que é 50% maior que a velocidade da vazão volumétrica de 1 L/s. O valor da velocidade para a vazão de 2 L/s é de 1,17 m/s, o que representa um acréscimo de 35% em comparação ao valor da velocidade da vazão volumétrica de 1,5 L/s, fazendo que a influência da velocidade na taxa de dissolução seja menor.

Uma característica dos experimentos 10 e 13 é que as vazões mássica e volumétrica não têm a mesma proporção. No caso do experimento 10 a vazão volumétrica é maior em comparação à vazão mássica e para o caso do experimento 13 a vazão mássica de sólido é maior em comparação a vazão volumétrica de líquido. No experimento 10, a taxa de dissolução foi de 36,87%. Este foi o experimento que apresentou a menor taxa de dissolução, pois trabalhou-se com a maior vazão volumétrica ($Q_3 = 2$ L/s) e a menor vazão mássica de sólido ($W_1 = 32$ g/s), ou seja, menor tempo de residência da partícula e menor quantidade sólidos adicionados. O

experimento 13 foi realizado com a menor vazão volumétrica ($Q1 = 1 \text{ L/s}$) e a maior vazão mássica ($W3 = 64 \text{ g/s}$), este apresentou uma taxa de dissolução de 62,69%, indicando que a taxa de dissolução é influenciada pela maior quantidade de sólidos adicionados e pelo maior tempo de residência da partícula no fluido.

4.4.2 Concentração de 32 g/L de NaCl

Foram realizados 5 experimentos com concentração inicial de 32 g/L de NaCl (concentração da água do mar). Os dados experimentais para este grupo de experimentos são apresentados na Tabela 18. Pode-se observar que o valor da concentração também aumenta ao longo do escoamento e os resultados são semelhantes aos resultados experimentais apresentados na Tabela 16. Na Tabela 18, o desvio padrão médio dos experimentos em sua maioria são inferiores a 10%.

Posição (m)	Concentração (g/L)									
	Exp2	σ	Exp5	σ	Exp8	Σ	Exp11	σ	Exp14	σ
1,35	50,02	1,61	41,54	1,05	40,87	0,88	37,52	0,65	54,05	2,03
3,51	52,63	1,79	43,16	1,42	42,55	1,43	38,48	1,06	61,40	2,57
5,67	55,25	1,88	45,74	1,67	45,13	1,30	40,03	0,94	65,53	2,95

Tabela 18 – Dados experimentais para concentração inicial de 32 g/L de NaCl.

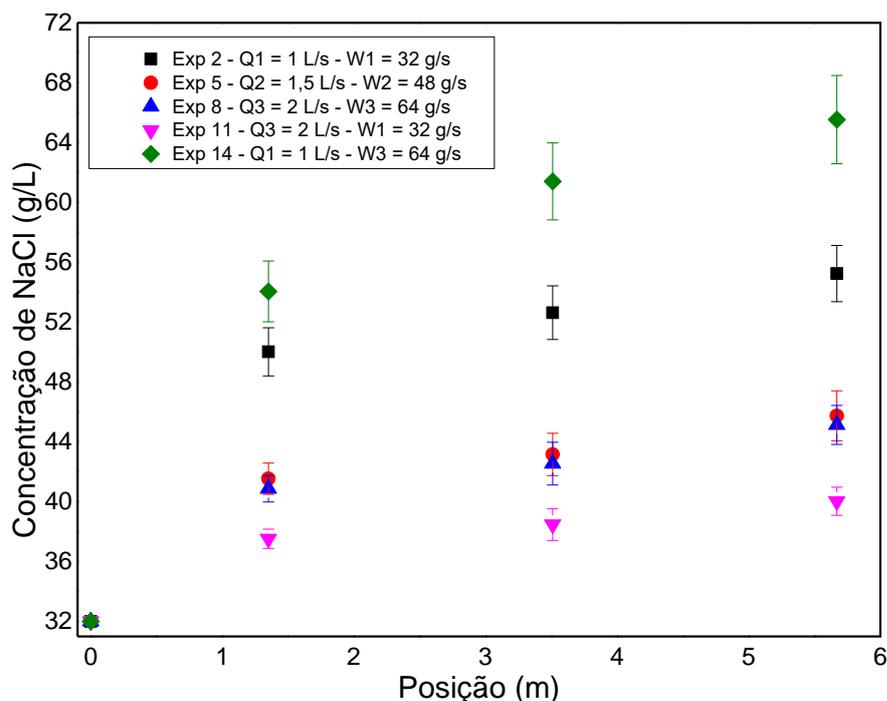


Figura 39 – Concentração de NaCl em função da posição para a concentração inicial de 32 g/L de NaCl.

Também foi realizado um balanço de massa, utilizando a equação 36 para determinar a quantidade massa de NaCl que se dissolveu durante o escoamento, para cada experimento.

Exp	Vazão de fluido (L/s)	Massa de entrada (g/s)	Massa dissolvida (g/s)	Massa não dissolvida (g/s)	% Dissolvido
2	1	32	23,25	8,75	72,66
5	1,5	48	20,61	27,39	43,0
8	2	64	26,26	37,74	41,0
11	2	32	16,06	15,94	50,18
14	1	64	33,54	30,46	52,4

Tabela 19 – Resultados do balanço de massa para a concentração de 32 g/L de NaCl.

Da Tabela 19 pode-se observar que, para este grupo de estudo, o experimento 2 foi o que apresentou a maior taxa de dissolução, sendo esta 72,66%. Os experimentos 5 e 8 apresentaram taxas de dissolução de 43% e 41% respectivamente, semelhante aos experimentos realizados com concentração inicial de 0 g/L de NaCl. É possível observar que a maiores vazões volumétricas a taxa de dissolução é menor, devido ao menor tempo de contato existente entre o sólido e o fluido.

Para os experimentos 11 e 14, realizados com diferentes proporções de vazão mássica (W) e vazão volumétrica (Q), as taxas de dissolução foram de 50,18% e 52,4% respectivamente.

Pode-se observar também que as taxas de dissolução deste grupo de experimentos são menores comparadas com as dos experimentos realizados com a concentração inicial de 0 g/L, isto devido ao menor gradiente de concentração existente por conta da maior concentração inicial de salmoura.

4.4.3 Concentração de 64 g/L de NaCl

Foram realizados 5 experimentos com concentração inicial de 64 g/L de NaCl (salmoura concentrada). Os dados experimentais para este grupo de experimentos são apresentados na Tabela 20.

Do mesmo modo que os experimentos com salmouras com concentração inicial de NaCl de 0 e 32 g/L, neste grupo de experimentos também se observa um elevado incremento na concentração no primeiro ponto de medida devido aos efeitos

dissolutivos originados pelo escoamento através da bomba. Mais uma vez o desvio padrão dos experimentos em triplicata que em sua maioria foram inferiores a 10%.

Posição (m)	Concentração (g/L)									
	Exp3	σ	Exp6	σ	Exp9	σ	Exp12	σ	Exp15	σ
1,35	77,89	1,48	72,04	0,80	71,48	0,82	69,27	0,73	83,69	1,88
3,51	80,75	1,74	72,85	1,59	72,06	1,36	69,49	1,19	91,84	2,30
5,67	83,25	1,94	76,08	1,24	75,61	1,16	71,44	1,03	96,16	2,58

Tabela 20 – Dados experimentais para concentração inicial de 64 g/L de NaCl.

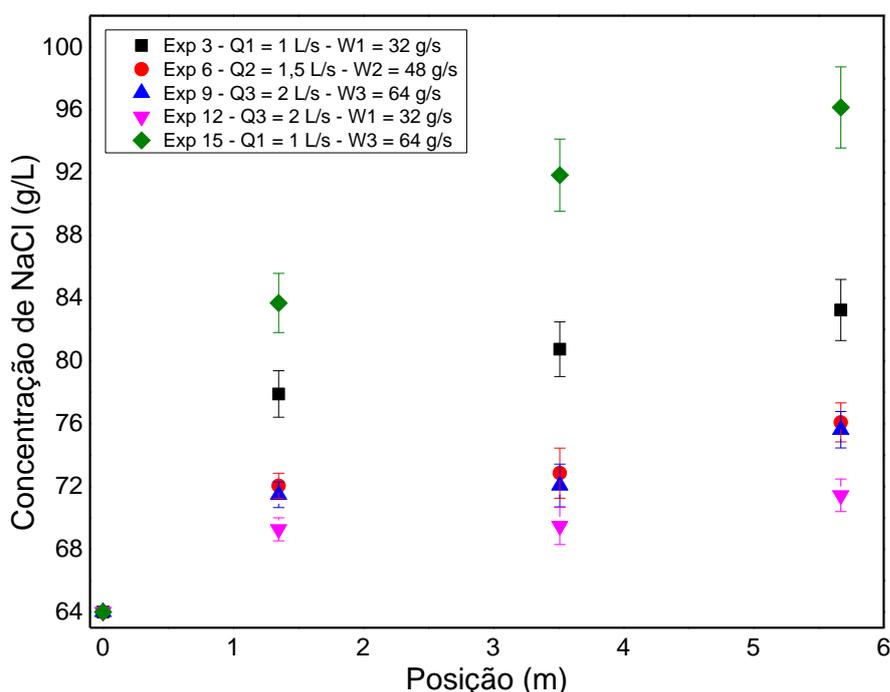


Figura 40 – Concentração de NaCl em função da posição para a concentração inicial de 64 g/L de NaCl.

Analisando todos os experimentos, pode-se observar que para concentrações maiores de salmoura, o efeito da bomba na cinética de dissolução é cada vez menor. Se para os experimentos realizados a concentração de 0 g/L de NaCl, as taxas de dissolução dentro da bomba variam entre 26 a 59,5%, as taxas de dissolução dentro da bomba, para a concentração de 64 g/L de NaCl variam entre 23 e 43,4%, isto ocorre devido à maior dificuldade que o fluido tem para dissolver sólidos a medida que fica mais concentrado. O balanço de massa para este grupo de estudo foi realizado utilizando a equação (36) e é apresentado na Tabela 21.

Exp	Vazão de fluido (L/s)	Massa de entrada (g/s)	Massa dissolvida (g/s)	Massa não dissolvida (g/s)	% Dissolvido
3	1	32	19,25	12,75	60,16
6	1,5	48	18,12	29,88	37,75
9	2	64	23,22	40,78	36,28
12	2	32	14,88	17,12	46,
15	1	64	32,16	31,84	50,28

Tabela 21 – Resultados do balanço de massa para a concentração de 64 g/L de NaCl.

Para os experimentos 3, 6, 9, 12 e 15 as taxas de dissolução foram de 60,16%, 37,75 %, 36,28%, 46,5% e 50,28% respectivamente. Este grupo de experimentos apresentam menores taxas de dissolução comparados com os experimentos realizados a menores concentrações iniciais de salmoura, comprovando assim que a maiores concentrações de salmoura, menor será a cinética de dissolução.

A porcentagem de sólidos dissolvidos no fluido para este grupo de experimentos é menor comparada com os experimentos anteriores, por exemplo para o experimento 3 só 60,16% dos sólidos foram dissolvidos, sendo que para os experimentos 1 e 2 que foram realizados com as mesmas vazões volumétricas e mássicas a porcentagem de dissolução superavam o 70%. Pode-se dizer que a medida que a concentração inicial de salmoura aumenta a cinética de dissolução diminui, isto devido à menor capacidade que o fluido tem para dissolver sólidos a medida que fica mais concentrado.

4.5 Estimação do coeficiente global de transferência de massa

O coeficiente global de transferência de massa está relacionado com a resistência ao processo de dissolução e sabe-se que é uma função do número de Reynolds e da temperatura (CREMASCO, 2002), como pode ser observado na equação (37), descrita por Patrão (2012).

$$K = K_o \cdot f(Re) \cdot f(T) \quad (37)$$

Segundo Bird *et al.* (2002), o coeficiente global de transferência de massa (K) é independente do número de Reynolds quando $Re > 10^4$. Como pode ser visto na Tabela (14), os valores do número de Reynolds da unidade experimental encontraram-se em regime plenamente turbulento e foram maiores que 10^4 . Assim

considerou-se que, nestas condições, o número de Reynolds não influenciou o coeficiente global de transferência de massa.

Durante a realização dos experimentos, percebeu-se uma variação da ordem 1°C, no máximo, na temperatura ao longo do escoamento. Desta forma, para este trabalho, considerou-se o sistema isotérmico e o coeficiente global de transferência de massa independente da temperatura.

Desta forma, considerou-se para este trabalho que o coeficiente global de transferência de massa é independente do número de Reynolds e da temperatura.

O valor de coeficiente global de transferência de massa foi estimado utilizando os dados experimentais de concentração dos experimentos 1, 4 e 7 para a concentração inicial de 0 g/L; 2, 5 e 8 para a concentração inicial de 32 g/L; 3, 6 e 9 para a concentração inicial de 64 g/L. Os dados experimentais dos experimentos 10, 11, 12, 13, 14 e 15 foram utilizados para a validação do modelo matemático. Para a estimação do coeficiente global de transferência de massa foi utilizado o programa MAXIMA em linguagem FORTRAN, este programa utiliza o método da máxima verossimilhança para realizar a estimação, o modelo matemático utilizado pode ser visto na seção 3.2 do presente trabalho. Foram consideradas duas abordagens para realizar a estimação do coeficiente global de transferência de massa, a primeira considera a variação do diâmetro das partículas de NaCl ao longo do escoamento e a segunda abordagem considera o diâmetro das partículas de NaCl constante ao longo do escoamento, como foi considerado nos trabalhos realizados por Patrão (2012) e Martins (2014).

Outra questão importante para estimar o coeficiente global de transferência de massa foi considerar que a unidade experimental é composta de duas regiões distintas: uma do contato do sólido com o fluido no alimentador de sólidos até a saída da bomba de deslocamento positivo (primeiro ponto de medida com o condutímetro) e o outro a tubulação de acrílico. Os coeficientes de transferência de massa estimados para as duas abordagens utilizadas são apresentados na Tabela 22.

Concentração Inicial de NaCl (g/L)	$K_{bomba} \cdot 10^4 (m/s)$		$K_{tub} \cdot 10^4 (m/s)$	
	Dp var	Dp cte	Dp var	Dp cte
0	4,94 ± 1,29	5,33 ± 1,14	1,43 ± 0,22	1,53 ± 0,23
32	4,13 ± 0,94	4,42 ± 0,84	1,18 ± 0,15	1,29 ± 0,19
64	3,66 ± 0,48	3,85 ± 0,45	1,12 ± 0,09	1,25 ± 0,13

Tabela 22 – Coeficientes de globais de transferência de massa estimados.

Observando a Tabela 22, pode-se dizer que o valor do coeficiente de transferência de massa do processo dentro da bomba é aproximadamente 4 vezes maior ao coeficiente que se tem quando o fluido escoar através da tubulação de acrílico, apresentando valores que variam entre $4,94 \cdot 10^{-4}$ a $3,66 \cdot 10^{-4} m/s$ para a primeira abordagem e entre $5,33 \cdot 10^{-4}$ a $3,85 \cdot 10^{-4} m/s$ para a segunda abordagem, ocasionando assim uma maior taxa de dissolução nesta região. Estes valores do coeficiente de transferência de massa estimados apresentam desvios elevados, isto deve-se à utilização de dois pontos de concentração para a estimação do parâmetro.

Uma vez que o fluido começa a escoar pela tubulação de acrílico só existe interação do fluido com o sólido, sem forças externas. Nesta parte do processo, podemos observar uma variação dos coeficientes de transferência de massa estimados entre $1,43 \cdot 10^{-4}$ a $1,12 \cdot 10^{-4} m/s$, para a primeira abordagem, e entre $1,53 \cdot 10^{-4}$ a $1,25 \cdot 10^{-4} m/s$, para a segunda abordagem.

Comparando os coeficientes de transferência de massa estimados para cada abordagem, pode-se observar que estes são semelhantes, tanto na bomba quanto na tubulação. Além disso, levando-se em conta os desvios, pode-se dizer que estes não são significativamente diferentes. Isso indica que as duas abordagens utilizadas são validas para estimar o coeficiente de transferência de massa, neste caso.

Pode-se observar, também, pela Tabela 22 que os valores do coeficiente de transferência de massa estimados para cada abordagem não são significativamente diferentes para as diferentes concentrações iniciais de salmoura utilizadas.

Os valores estimados para o coeficiente de transferência de massa encontram-se na mesma ordem de grandeza que os valores encontrados na literatura. Os valores estimados do coeficiente global de transferência de massa dentro da tubulação de acrílico se encontram mais próximos do valor do coeficiente estimado por Aksel'Rud (1992) e Meneses (2016). Aksel'Rud (1992) estimou um valor para o coeficiente global de transferência de massa de NaCl em água igual a $1,0 \cdot 10^{-4} m/s$. Este trabalho estimou que o coeficiente varia entre $1,12 \cdot 10^{-4}$ a $1,43 \cdot 10^{-4} m/s$, isto pode-se dever a algumas semelhanças entre os trabalhos, como ter a utilização de uma área de transferência de massa fixa e que as partículas de sólido escoam juntamente com o fluido. O uso de água destilada como solvente pode ter influenciado o valor do coeficiente global de transferência de massa estimado por Aksel'Rud (1992). Meneses (2016) estimou valores do coeficiente global de transferência de massa entre $1,1 \cdot 10^{-4}$

a $0,950 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$, neste trabalho foram estimados valores semelhantes. Valores de coeficiente de transferência de massa para diferentes sistemas podem ser vistos na Tabela 23.

Autores	Valores de $K \cdot 10^4(\text{m/s})$	Observações
Aksel'rud <i>et al.</i> (1992)	1,0	Partículas cilíndricas, área interfacial constante, água pura.
Magalhães <i>et al.</i> (2011)	0,155-0,894	Sistema agitado em tanque de mistura.
Patrão (2012)	5,44	Unidade de escoamento em calha, diâmetro da partícula constante, $C_i = 32 \text{ g/L}$ de NaCl.
Martins (2014)	1,8-5,44	Unidade de escoamento em calha, diâmetro da partícula constante. Diferentes concentrações de NaCl.
Meneses (2016)	1,110-0,950	Tanque de mistura, salmoura e fluidos não newtonianos (soluções de goma xantana), diâmetro da partícula variável.
Presente trabalho	4,90-3,69 (bomba – Dp var)	Unidade de escoamento em tubo, adição de partículas sólidas durante o escoamento.
	5,33-3,85 (bomba – Dp cte)	
	1,43-1,12 (Tubulação – Dp var)	
	1,53-1,25 (Tubulação – Dp cte)	

Tabela 23 – Coeficientes de transferência de massa achados na literatura.

Os valores obtidos por Patrão (2012) e Martins (2014) para o coeficiente de transferência de massa se assemelham aos obtidos na bomba neste trabalho. Os autores utilizaram escoamento em calha, onde as partículas rolavam sobre a mesma e havia grande contato entre elas. Esse sistema favoreceu a troca de massa de forma semelhante à transferência de massa ocorrida na bomba.

4.6 Simulações do experimento e validação do modelo

Uma vez que os coeficientes globais de transferência de massa foram estimados procedeu-se às simulações para verificar se o modelo matemático é capaz de simular os perfis de concentração experimentais.

Para realizar as simulações foram consideradas as duas abordagens, a primeira considerando a variação do diâmetro dos sólidos adicionados ao fluido ao longo do escoamento e a segunda abordagem considera que o diâmetro dos sólidos é constante. O modelo matemático utilizado pode ser visto no tópico 3.2 do presente trabalho. Desta forma, os gráficos dentro deste tópico apresentam duas curvas, onde a curva com linha sólida representa a abordagem que considera a variação do diâmetro dos sólidos e a curva com linha pontilhada considera o diâmetro dos sólidos como constante.

Na sequência, serão apresentadas e discutidas as simulações realizadas utilizando os coeficientes globais de transferência de massa estimados. As Figuras 41, 45 e 49 apresentam os resultados experimentais e simulados para as concentrações de 0, 32 e 64 g/L de NaCl, respectivamente. Este grupo de experimentos foi utilizado para estimar os valores dos coeficientes de transferência de massa.

As Figuras 42, 46 e 50 apresentam os resultados do grupo de experimentos que foram separados para validar o modelo para as concentrações iniciais de 0, 32 e 64 g/L de NaCl respectivamente.

As Figuras 43, 47 e 51 apresentam os desvios relativos dos perfis de concentração simulados com os experimentais para a abordagem que considera a variação do diâmetro da partícula e as Figuras 44, 48 e 52 apresentam os desvios relativos para a abordagem que considera a diâmetro da partícula constante. Tabelas com os valores dos desvios relativos para cada experimento podem ser vistas no Anexo C.

- Concentração inicial de 0 g/L de NaCl

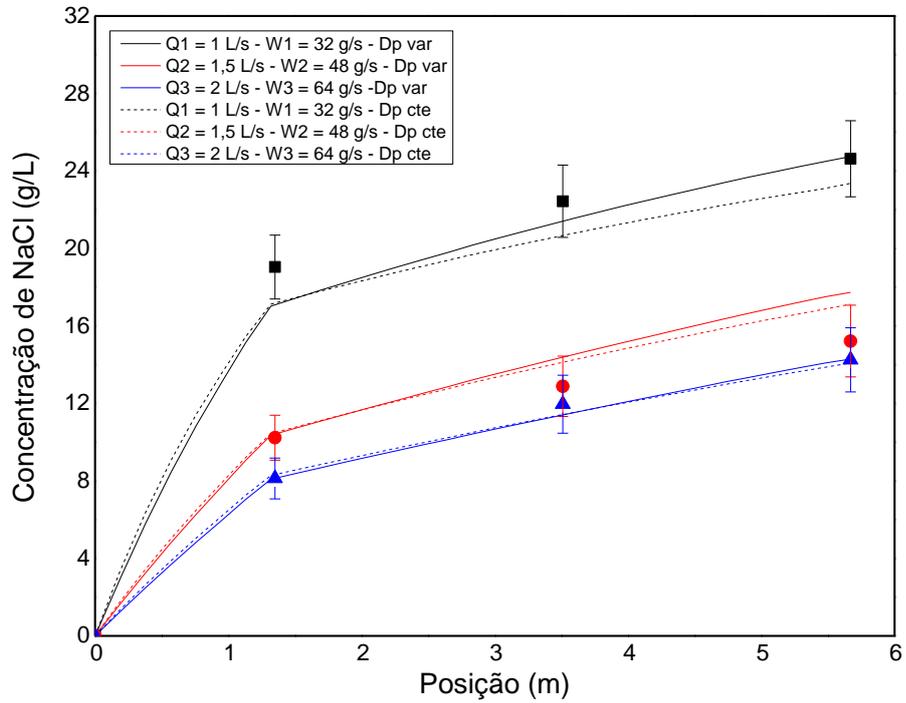


Figura 41 – Simulação e dados experimentais para a concentração de 0 g/L de NaCl.

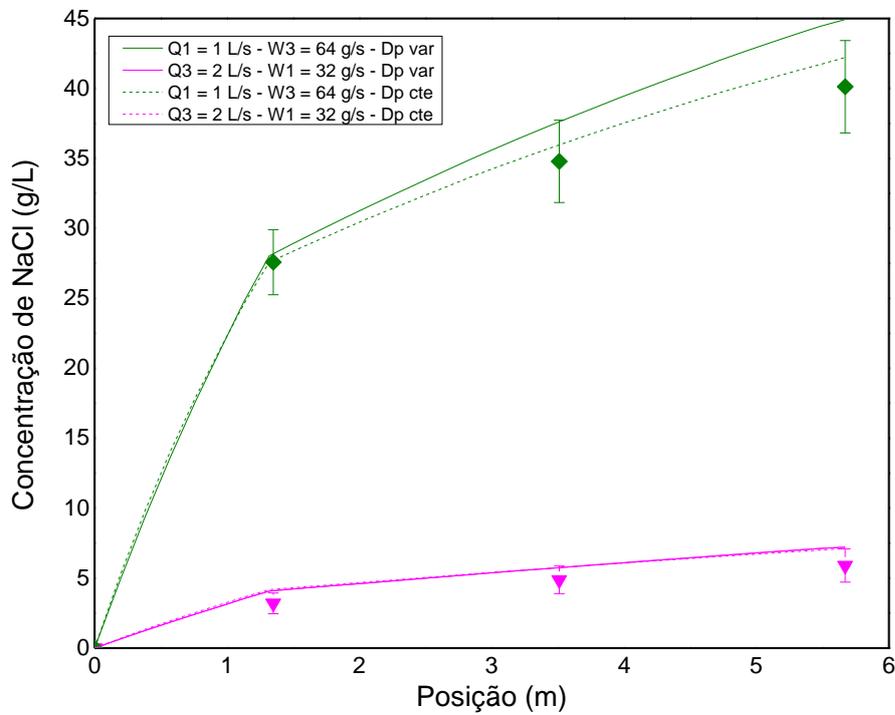


Figura 42 – Validação do modelo para a concentração de 0 g/L de NaCl.

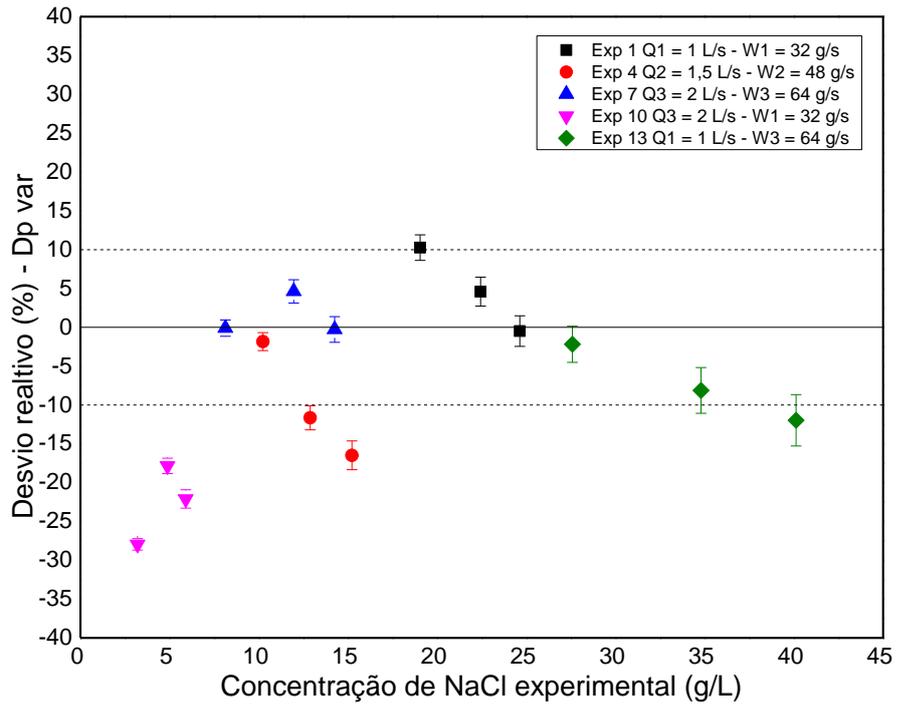


Figura 43 – Desvio relativo do perfil de concentração simulado quando se considera a variação do diâmetro da partícula para a concentração inicial de 0 g/L de NaCl.

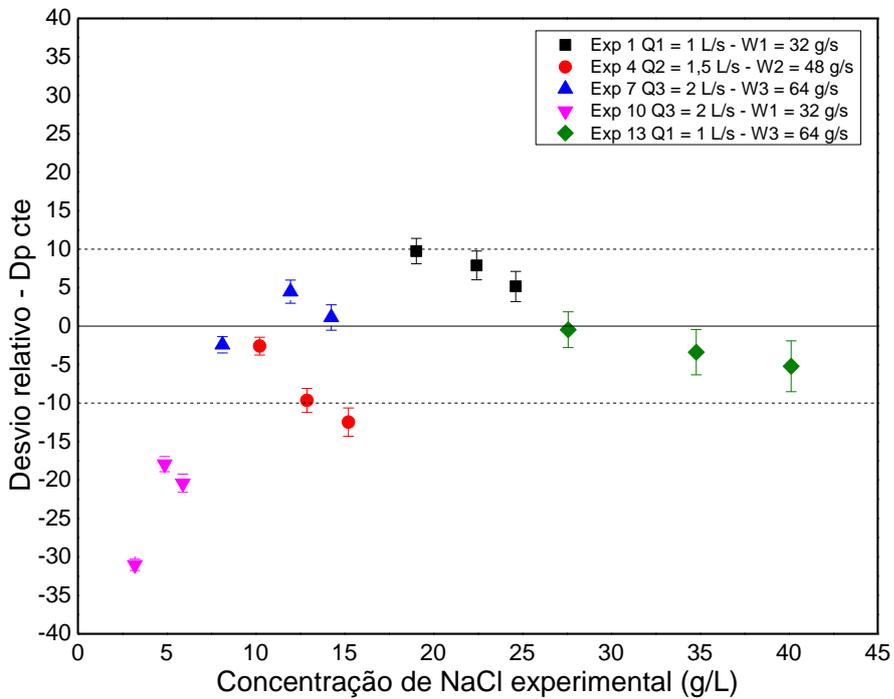


Figura 44 – Desvio relativo do perfil de concentração simulado quando se considera o diâmetro da partícula constante para a concentração inicial de 0 g/L de NaCl.

- Concentração inicial de 32 g/L de NaCl

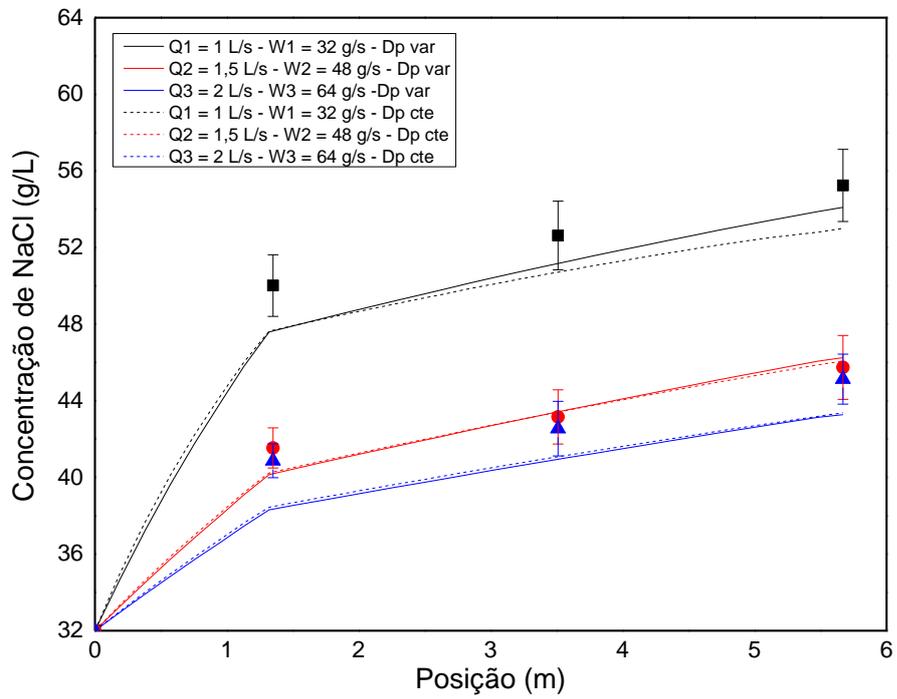


Figura 45 – Simulação e dados experimentais para a concentração de 32 g/L de NaCl.

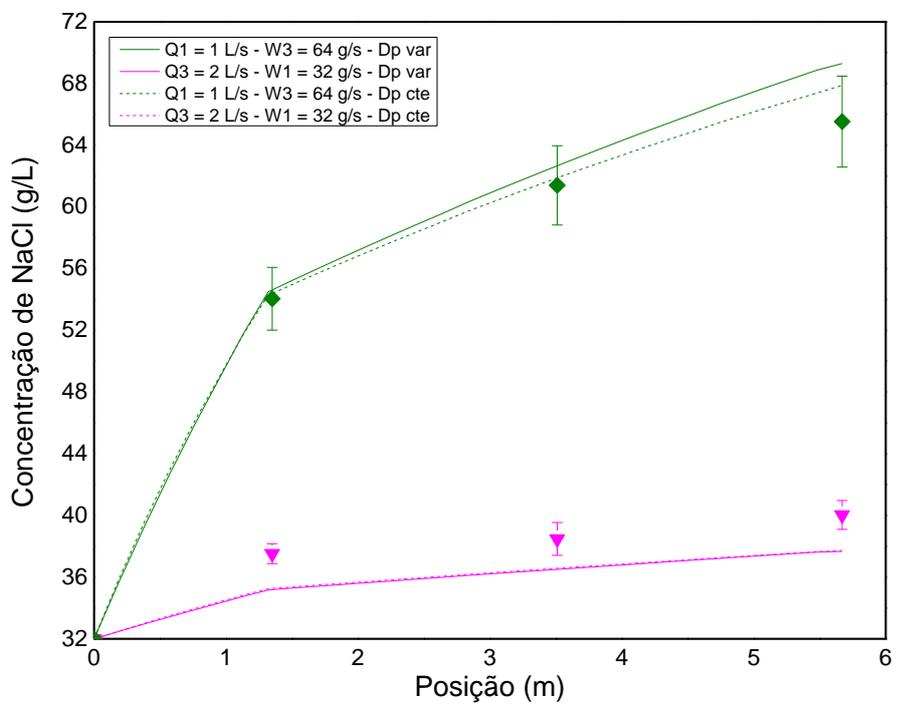


Figura 46 – Validação do modelo para a concentração de 32 g/L de NaCl.

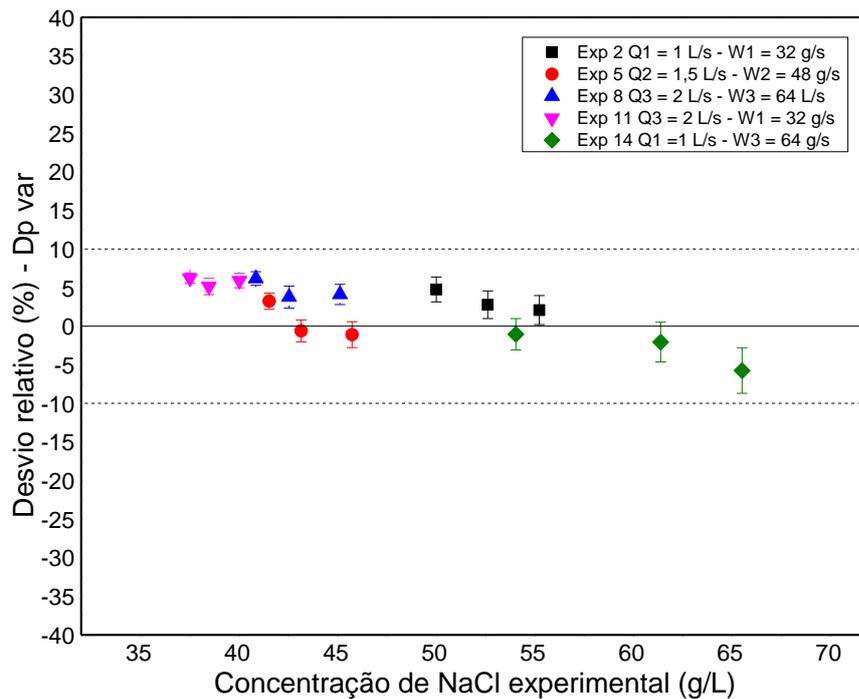


Figura 47 – Desvio relativo do perfil de concentração simulado quando se considera a variação do diâmetro da partícula para a concentração inicial de 32 g/L de NaCl.

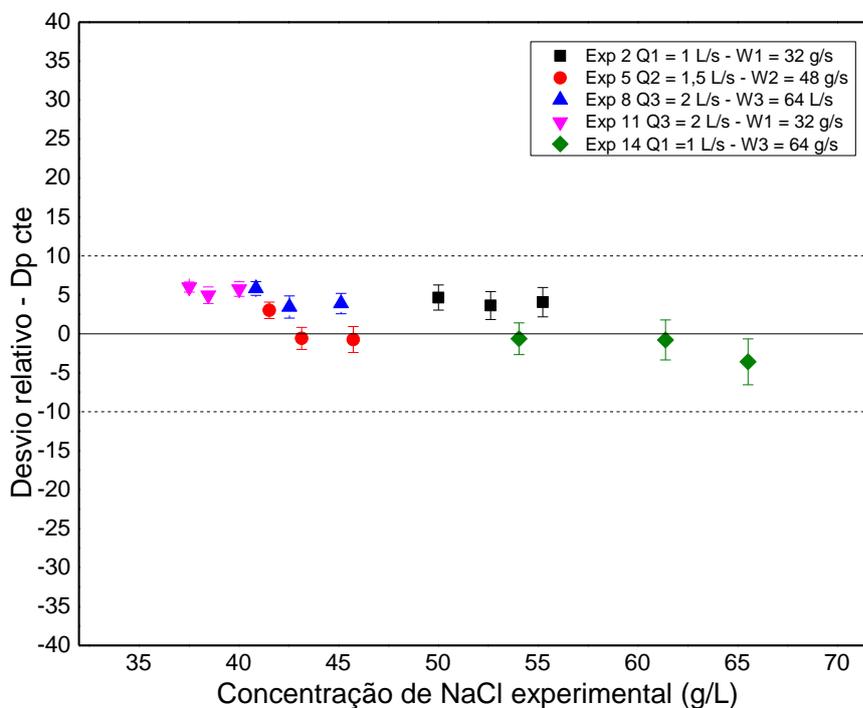


Figura 48 – Desvio relativo do perfil de concentração simulado quando se considera o diâmetro da partícula constante para a concentração inicial de 32 g/L de NaCl.

- **Concentração inicial de 64 g/L de NaCl**

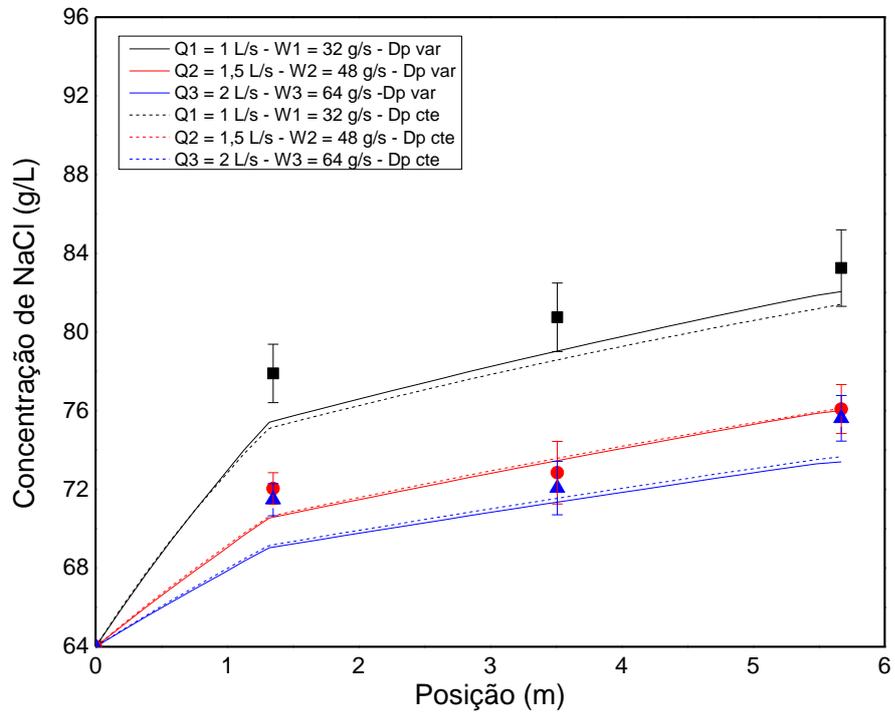


Figura 49 – Simulação e dados experimentais para a concentração de 64 g/L de NaCl.

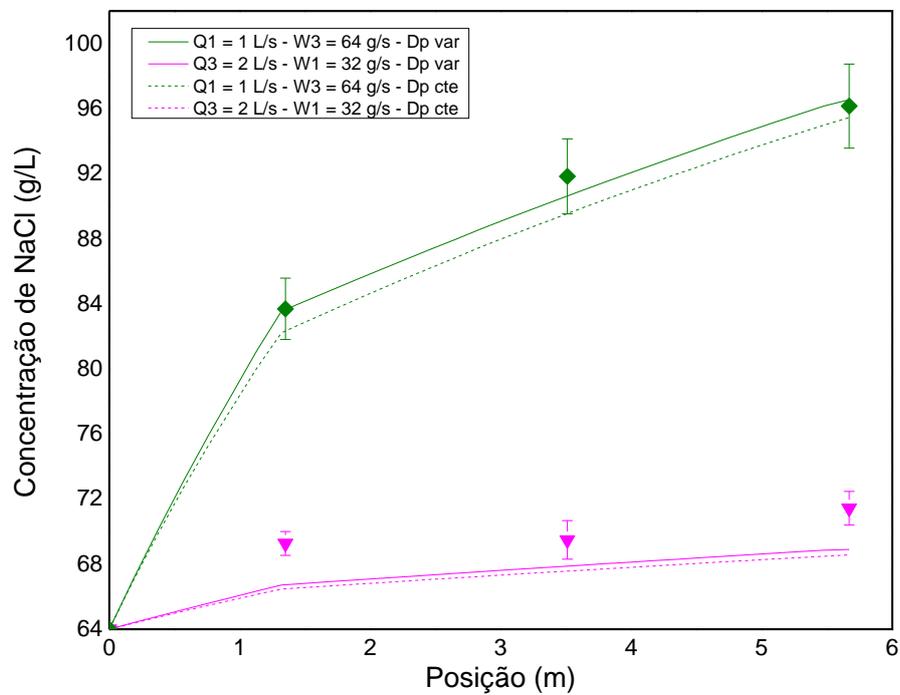


Figura 50 – Validação do modelo para a concentração de 64 g/L de NaCl.

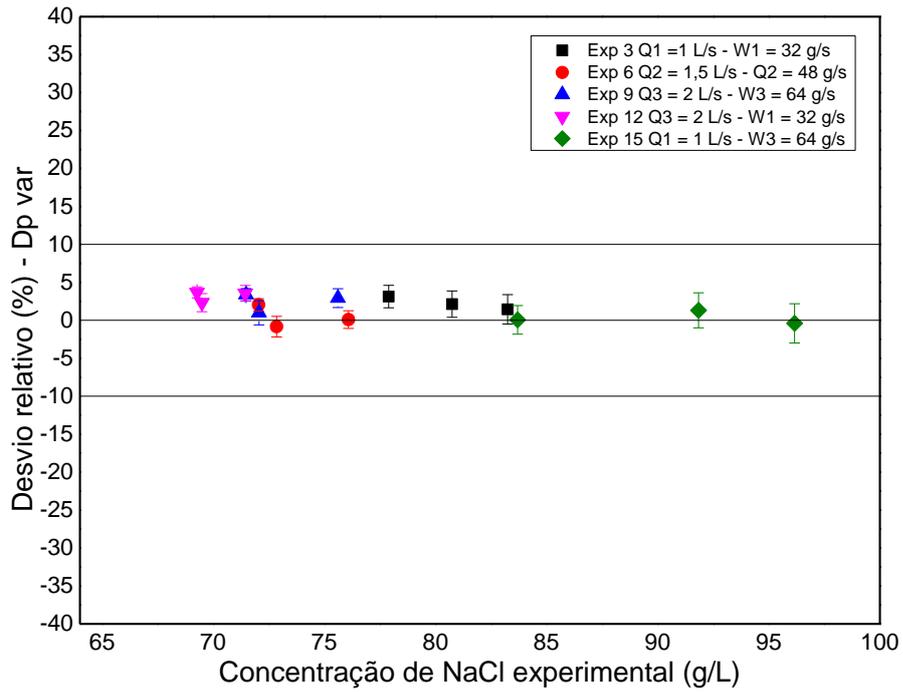


Figura 51 – Desvio relativo do perfil de concentração simulado quando se considera a variação do diâmetro da partícula para a concentração inicial de 64 g/L de NaCl.

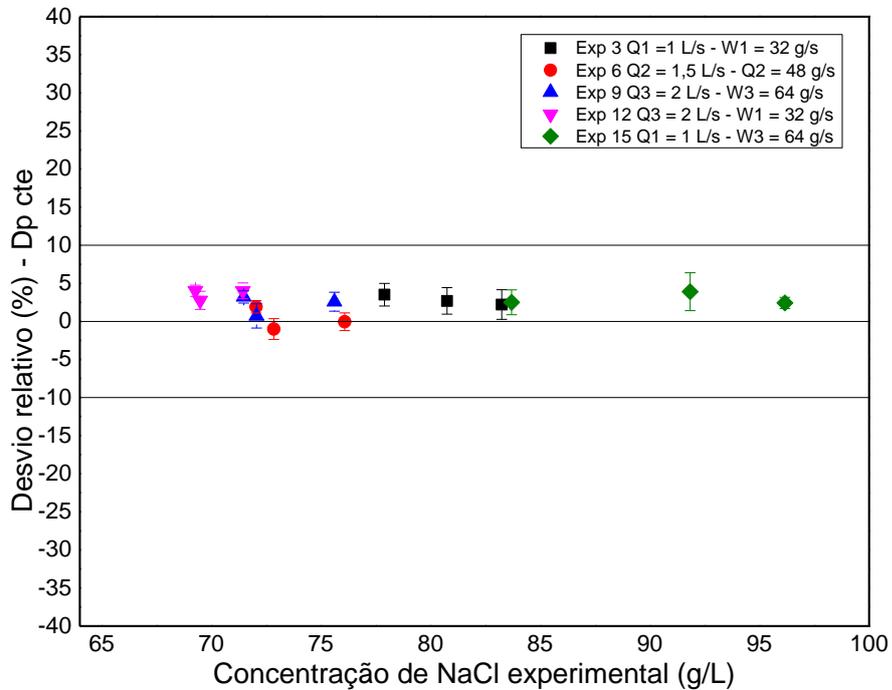


Figura 52 – Desvio relativo do perfil de concentração simulado quando se considera o diâmetro da partícula constante para a concentração inicial de 64 g/L de NaCl.

Analisando os resultados obtidos pelas simulações e comparando-os com os resultados experimentais pode-se dizer que as duas abordagens propostas conseguem modelar adequadamente o processo de dissolução de NaCl para a unidade experimental de escoamento utilizada.

Os desvios encontram-se em sua maioria abaixo de 5%. Um resumo dos desvios relativos para cada concentração inicial de NaCl, pode ser visto na Tabela 24. Os desvios relativos de todos os experimentos realizados podem ser encontrados no Anexo C.

Concentração inicial de NaCl (g/L)	Desvio relativo médio – Dp var (%)	Desvio relativo médio – Dp cte (%)
0	9,37	8,94
32	3,64	3,44
64	1,88	2,24
Desvio médio total	4,95	4,88

Tabela 24 – Desvio relativo médio para cada concentração inicial de NaCl.

Da Tabela 24 pode-se observar que o desvio relativo médio para a abordagem que considera a variação do diâmetro da partícula foi de 4,95% e para abordagem que considera o diâmetro da partícula constante foi de 4,88%.

4.7 Simulações da fração volumétrica de sólidos

Com o modelo validado, foram realizadas simulações da fração volumétrica de sólidos como uma função da posição. Como não existem dados experimentais destes não se pode realizar uma comparação.

As simulações da fração volumétrica sólidos são apresentadas nas Figuras 53, 54 e 55, onde a curva com linha sólida é a abordagem que considera a modelagem com a variação do diâmetro das partículas e a curva com linha pontilhada é a abordagem que considera o diâmetro da partícula constante.

- **Concentração inicial de 0 g/L de NaCl**

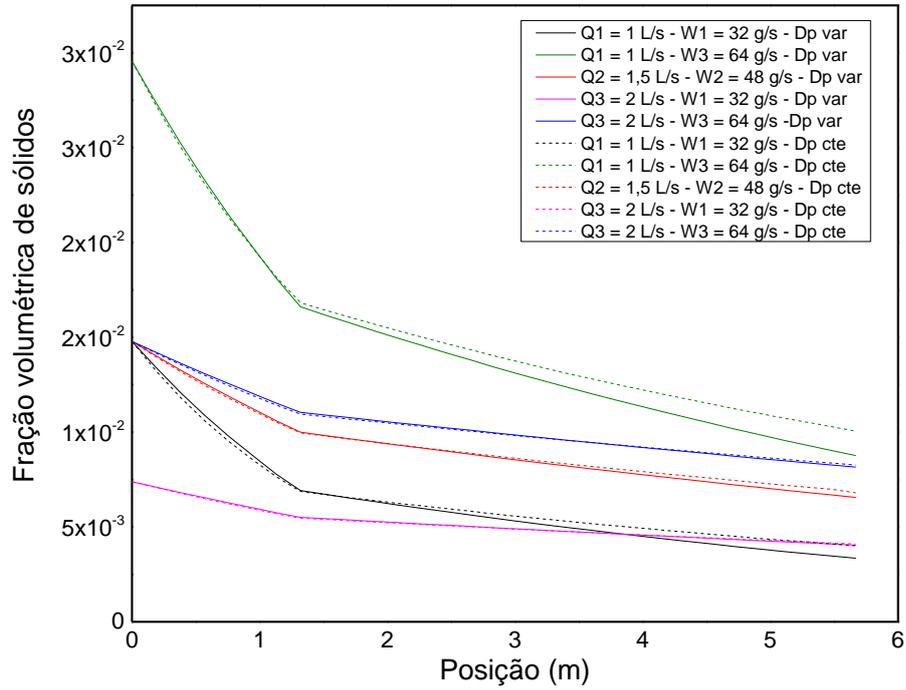


Figura 53 – Simulação da fração volumétrica para a concentração inicial de 0 g/L de NaCl.

- **Concentração inicial de 32 g/L de NaCl**

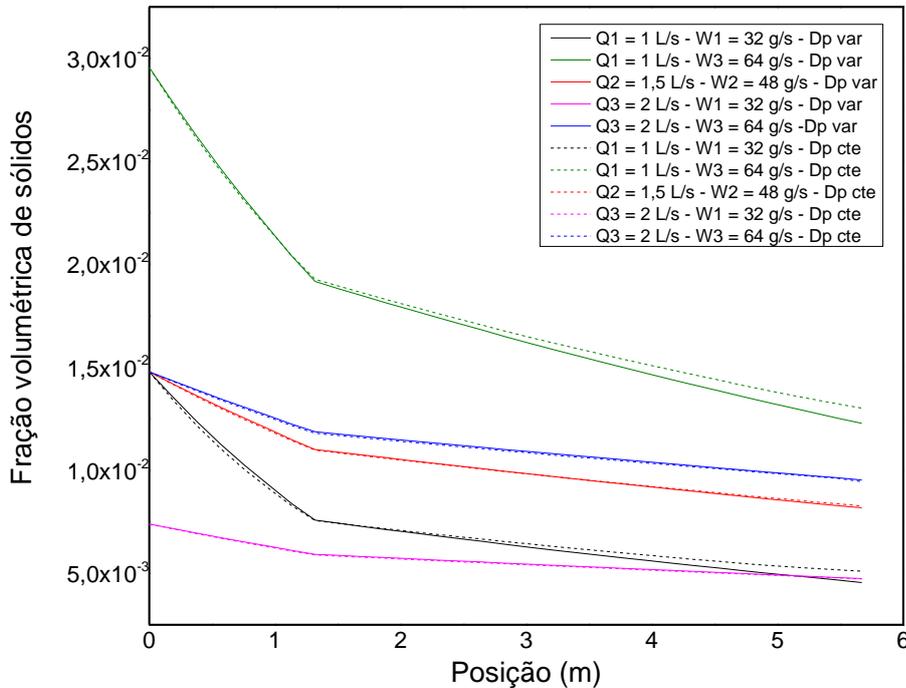


Figura 54 – Simulação da fração volumétrica para a concentração inicial de 32 g/L de NaCl.

- **Concentração inicial de 64 g/L de NaCl**

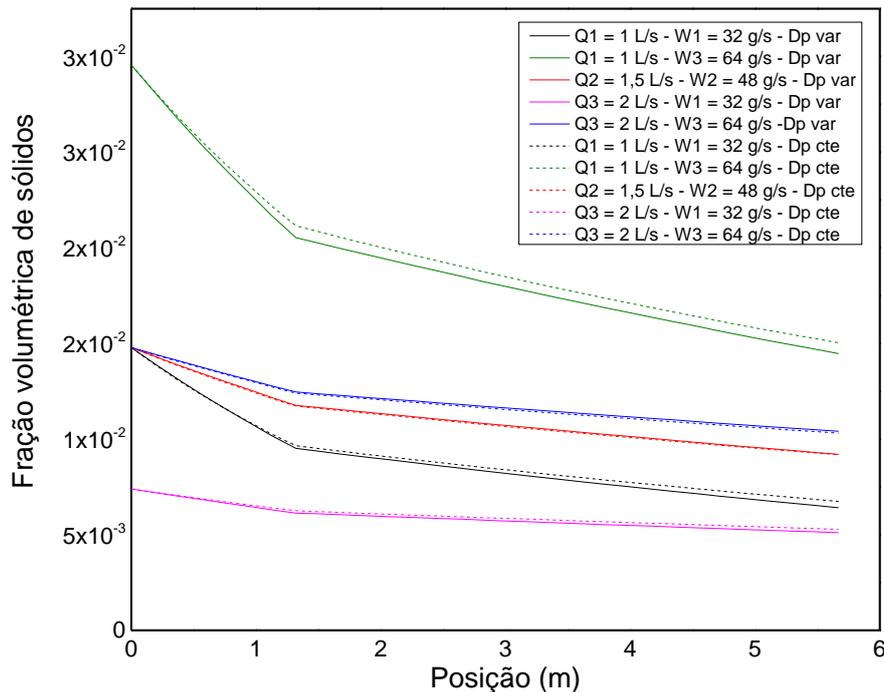


Figura 55 – Simulação da fração volumétrica para a concentração inicial de 64 g/L de NaCl.

Dos gráficos apresentados, pode-se observar que a maior variação da fração volumétrica de sólidos se encontra nos primeiros metros do escoamento, região onde a bomba de deslocamento positivo se encontra posicionada. Os perfis de concentração gerados anteriormente comprovam que esta é a região onde a cinética de dissolução é maior e é por este motivo que existe uma maior diminuição na fração volumétrica de sólidos.

Nos experimentos realizados com a mesma proporção de Q e W pode-se ver que a medida que a concentração do fluido aumenta, as curvas aproximam-se uma da outra, isto se deve a existência de uma menor cinética de dissolução a medida em que a concentração aumenta.

4.8 Simulações do diâmetro médio das partículas

Neste tópico serão apresentadas as simulações para a variação do diâmetro médio das partículas de NaCl ao longo do escoamento. Estas simulações foram realizadas utilizando a primeira abordagem, que considera a variação do diâmetro das partículas ao longo do escoamento e são apresentadas nas Figuras 56, 57 e 58.

- **Concentração inicial de 0 g/L de NaCl**

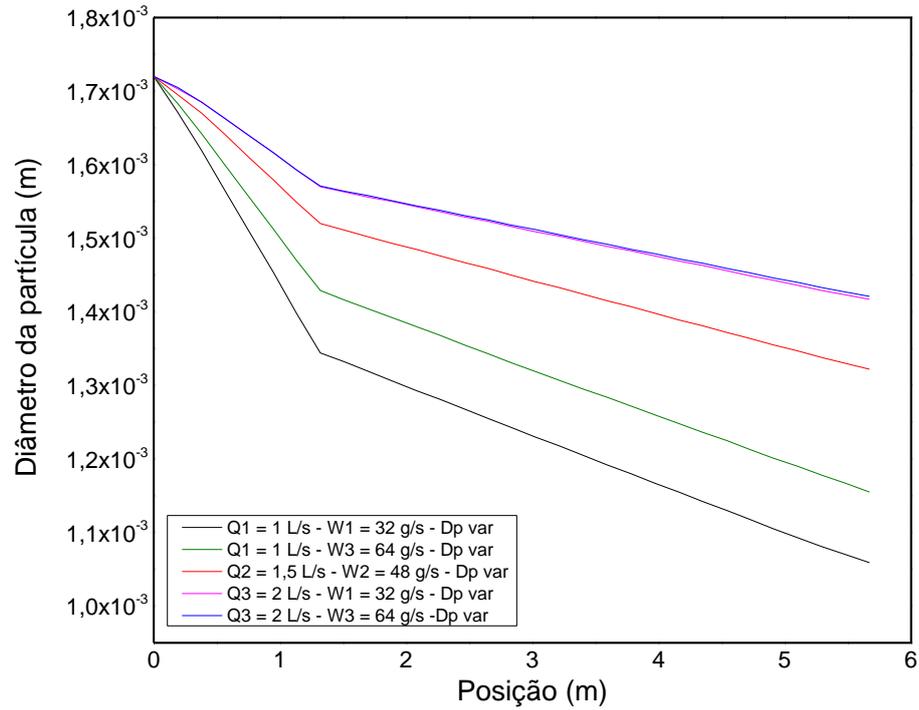


Figura 56 – Simulação do diâmetro da partícula para a concentração inicial de 0 g/L de NaCl.

- **Concentração de inicial 32 g/L de NaCl**

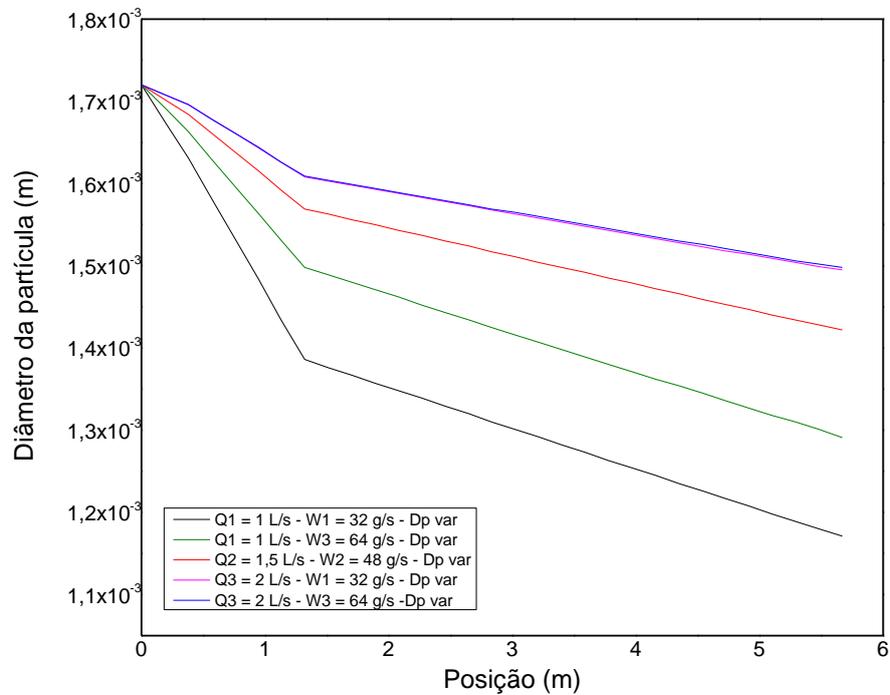


Figura 57 – Simulação do diâmetro da partícula para a concentração inicial de 32 g/L de NaCl.

- **Concentração inicial de 64 g/L de NaCl**

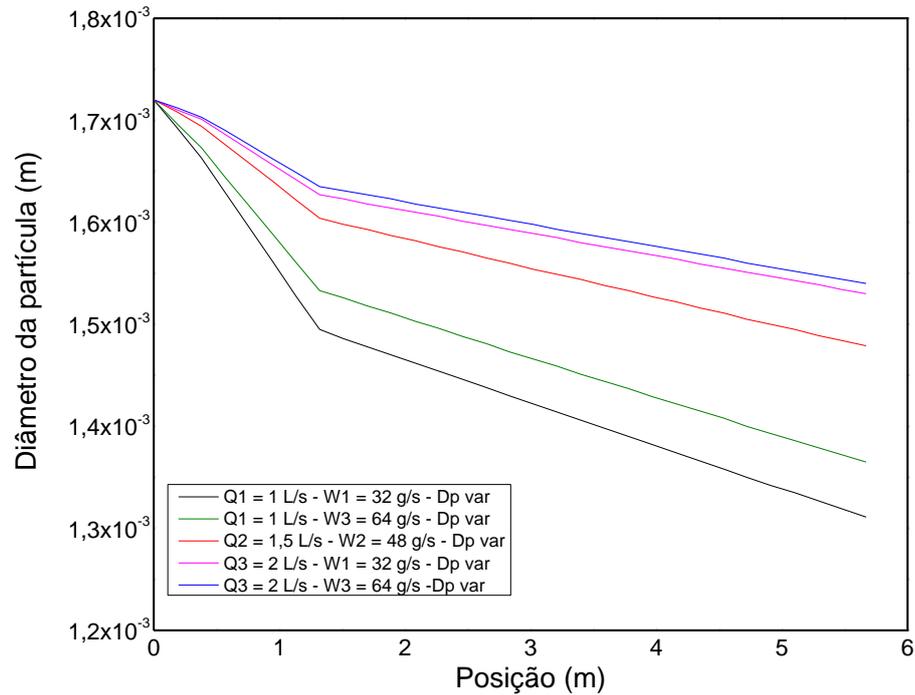


Figura 58 – Simulação do diâmetro da partícula para a concentração inicial de 64 g/L de NaCl.

Nos gráficos apresentados pode-se destacar a grande influência do escoamento do fluido através da bomba, visto que é nesta região onde se ocorre a maior diminuição de diâmetro devido à elevada cinética de dissolução. Pode-se observar também que, em nenhum dos casos, a totalidade das partículas se dissolveram completamente, e o diâmetro médio de Sauter final em todos os casos está em torno de 1,0 a 1,5 mm.

4.9 Simulações com condições diferentes das experimentais

Com o modelo já validado, alguns parâmetros de entrada foram alterados para avaliar a dissolução em outras condições. Dentre as variáveis que podem ser alteradas, tem-se:

- Distância máxima de escoamento;
- Vazão volumétrica e mássica.

Com o objetivo de simular o efeito da dissolução de NaCl em condições que não são possíveis de atingir tecnicamente na unidade experimental, foram realizadas

simulações alterando os parâmetros mencionados anteriormente. No entanto, simulações utilizando outro tipo de fluido que não seja salmoura não foram realizadas neste trabalho.

Como a abordagem que considera a variação do diâmetro das partículas ao longo do escoamento se encontra mais próxima das condições reais do fenômeno de dissolução, decidiu-se realizar este grupo de simulações só considerando esta abordagem.

4.9.1 Simulações com maior distância de escoamento

Neste grupo de simulações, a variável a ser alterada será a distância de escoamento. Escolheu-se uma distância de 29 m, que é a distância de escoamento da unidade utilizada por Patrão (2012) e Martins (2014). Esta simulação só avaliará o trecho reto de tubulação, assim os valores iniciais de concentração de sal serão os valores experimentais na saída da segunda bomba de deslocamento positivo. As Figuras 59, 60 e 61 e as Tabelas 25, 26 e 27 apresentam os resultados das simulações com maior distância de escoamento.

- **Concentração inicial de 0 g/L de NaCl**

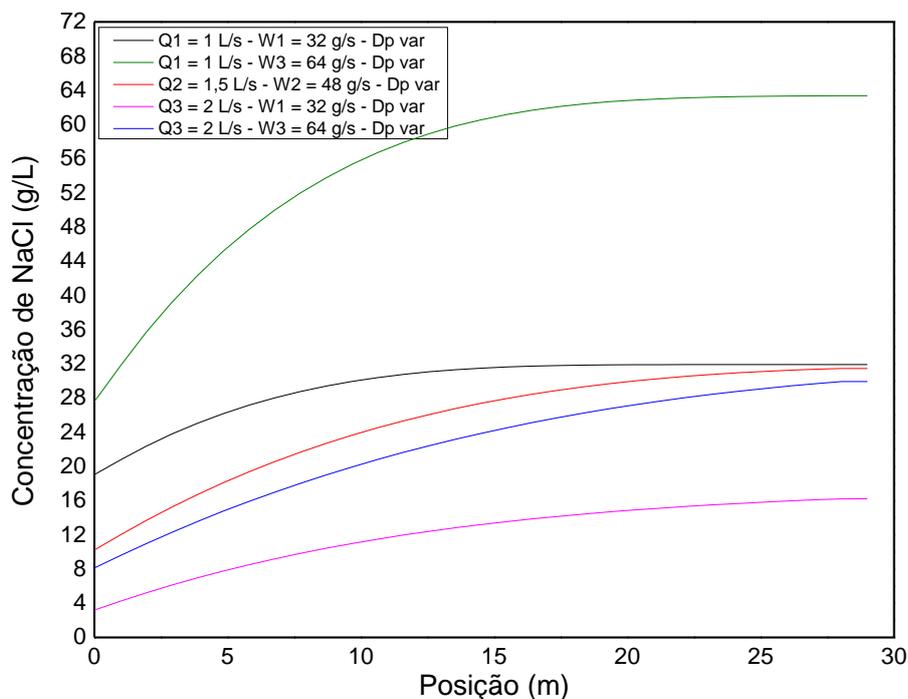


Figura 59 – Simulação com 29 m de escoamento para a concentração inicial de 0 g/L de NaCl.

Exp	Concentração na saída da bomba (g/L)	% de NaCl dissolvido no fluido				
		5 m	10 m	20 m	25 m	29 m
Q1 – W1	19,04	82,34	94,06	99,68	100	100
Q1 – W3	27,58	71,29	87,21	98,21	100	100
Q2 – W2	10,23	57,25	74,87	94,37	97,25	98,31
Q3 – W1	3,2	49,37	69,81	93,25	98,93	100
Q3 – W3	8,13	46,78	63,85	85,09	91	93,56

Tabela 25 – Porcentagem de massa de NaCl dissolvido em determinadas distancias para a concentração inicial de 0 g/L.

- **Concentração inicial de 32 g/L de NaCl**

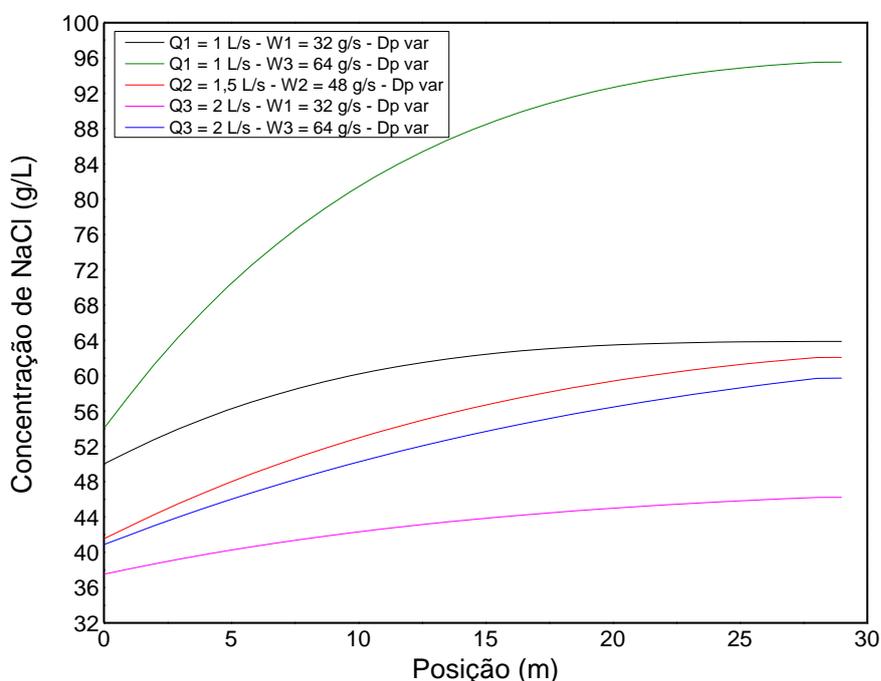


Figura 60 – Simulação com 29 m de escoamento para a concentração inicial de 32 g/L de NaCl.

Exp	Concentração na saída da bomba (g/L)	% de NaCl dissolvido no fluido				
		5 m	10 m	20 m	25 m	29 m
Q1 – W1	50,02	75,75	88,09	98,5	99,5	100
Q1 – W3	54,02	60,0	77,89	95,06	98,28	99,28
Q2 – W2	41,54	49,96	65,46	86,03	91,59	94,03
Q3 – W1	37,52	51,56	64,43	81,56	86,56	88,93
Q3 – W3	40,87	43,75	56,96	76,87	83,37	86,65

Tabela 26 – Porcentagem de massa de NaCl dissolvido em determinadas distancias para a concentração inicial de 32 g/L.

- **Concentração inicial de 64 g/L de NaCl**

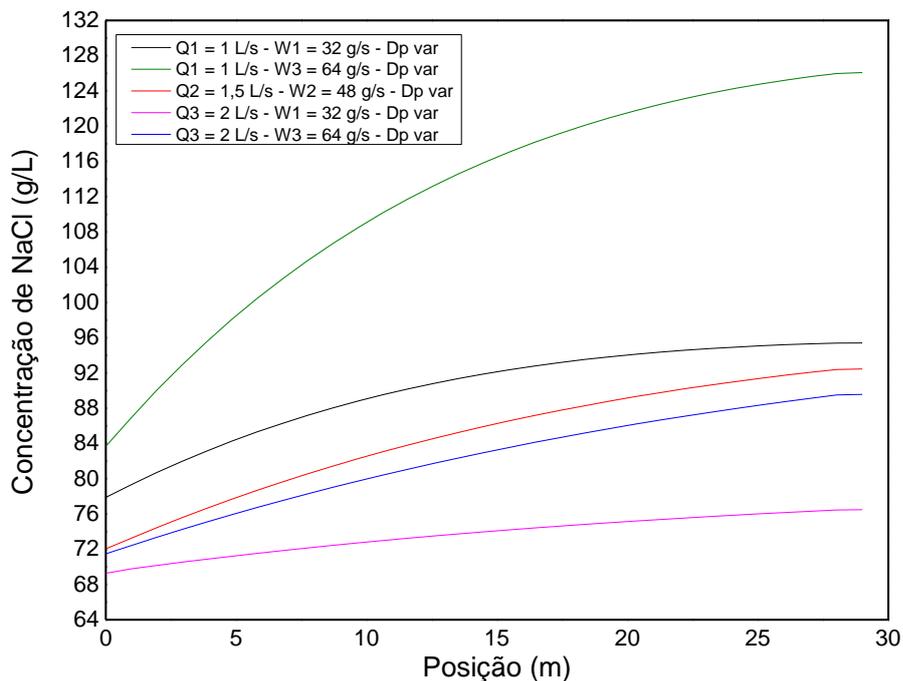


Figura 61 – Simulação com 29 m de escoamento para a concentração inicial de 64 g/L de NaCl.

Exp	Concentração na saída da bomba (g/L)	% de NaCl dissolvido no fluido				
		5 m	10 m	20 m	25 m	29 m
Q1 – W1	77,89	63,87	78,31	94,12	97,15	100
Q1 – W3	83,69	53,90	70,42	90,25	95,0	97,01
Q2 – W2	72,04	43,31	57,96	79,09	85,62	88,90
Q3 – W1	69,27	45,37	55,06	70,0	75,18	78,06
Q3 – W3	71,48	37,68	49,90	69,34	76,18	79,9

Tabela 27 – Porcentagem de massa de NaCl dissolvido em determinadas distancias para a concentração inicial de 64 g/L.

Analisando as Figuras 59, 60 e 61 e as Tabelas 25,26 e 27 pode-se observar que só as simulações realizadas com as vazões volumétricas mínimas (Q1-W1) conseguiram dissolver o total de sólidos adicionados durante o escoamento, sendo que as simulações realizadas com concentrações iniciais maiores precisarão de uma distância de escoamento maior para ocorrer a completa dissolução das partículas de sal. Para a concentração inicial de 0 g/L esta distância foi de 22 m, 26 m para a concentração 32 g/L e 29 m para a concentração inicial de 64 g/L. Este aumento na distância se deve à menor cinética de dissolução existente para as maiores

concentrações iniciais de salmoura. Fazendo uma análise para as demais simulações pode-se observar que estas apresentam taxas de dissolução até completar os 29 m de escoamento, entre 79% e 98%, sendo que as simulações que apresentam a menor taxa de dissolução foram as realizadas com as maiores condições de vazão volumétrica e mássica Q3 – W3, sendo estas 90,8% para a concentração de 0 g/L, 85,1% para a concentração de 32 g/L e 79,2% para a concentração de 64 g/L, comprovando assim que a maiores vazões volumétricas a cinética de dissolução é menor devido ao menor tempo de contato do sólido com o fluido. De forma semelhante aos trabalhos realizados por Patrão (2012) e Martins (2014), pode-se perceber que a maior taxa de dissolução acontece nos primeiros metros do escoamento, já que em maiores distâncias a cinética de dissolução é menor devido a menor quantidade existente de sólido para ser dissolvido e a maior concentração que o fluido apresenta.

4.9.2 Simulações com maior vazão volumétrica e mássica

Para este grupo de simulações, as variáveis a serem alteradas são a vazão volumétrica e a vazão mássica de sólidos. Foi utilizada uma vazão volumétrica de 5 L/s e uma vazão mássica de 160 g/s, neste caso, as simulações contemplam a passagem do fluido através da segunda bomba de deslocamento positivo. Os resultados destas simulações podem ser vistos na Figura 62 e na Tabela 28.

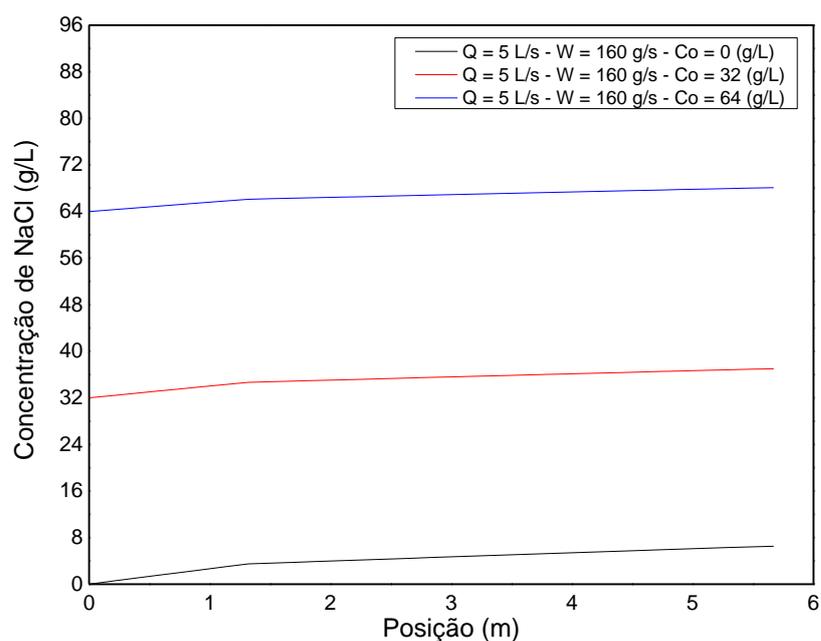


Figura 62 – Simulação com maior vazão volumétrica e mássica.

Posição (m)	Concentração (g/L)		
0	0		64
1,35	3,51	34,69	66,15
3,51	5,07	35,88	67,14
5,67	6,52	36,99	68,09

Tabela 28 – Valores de concentração simulados para $Q = 5$ L/s e $w = 160$ g/s.

Analisando a Tabela 25 pode-se dizer que quanto maior vazão volumétrica e maior concentração inicial de salmoura, menor será o efeito da bomba na dissolução

Realizou-se um balanço de massa utilizando a equação 36, para determinar a quantidade de sólidos que foram dissolvidos durante o processo.

Concentração Inicial (g/L)	Massa de entrada (g)	Massa dissolvida (g)	Massa restante (g)	% Dissolvido
0		32,60	127,40	20,37
32	160	24,95	135,05	15,59
64		20,45	139,55	12,78

Tabela 29 – Resultados do balanço de massa para $Q = 5$ L/s e $W = 160$ g/s.

Da Tabela 29 pode-se observar que para estas condições existe uma menor taxa de dissolução. Para a vazão de 5 L/s, as taxas de dissolução para as concentrações de 0, 32 e 64 g/L foram de 20,37% 15,59% e de 12,78% respectivamente. Esta diminuição na cinética de dissolução se deve a alta velocidade do fluido, originando assim um menor tempo de residência entre as partículas de NaCl e o fluido.

CAPITULO V

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos no presente trabalho, podemos concluir que:

Referente a unidade experimental:

- A unidade experimental montada foi capaz de gerar dados experimentais de concentração de NaCl em fluido escoando em tubulação, com boa repetibilidade e desvios médios inferiores a 10%;
- Foi capaz de reproduzir o regime de escoamento de processos reais.

Referente aos estudos de cinética de dissolução:

- A medida que a concentração de sal do fluido base aumenta a cinética de dissolução diminui;
- A taxa de dissolução nas tubulações é menor a elevadas vazões volumétricas, devido ao pouco tempo de contato entre o sólido e o fluido e é maior a elevadas vazões mássicas devido a existência de uma quantidade maior de partículas para serem dissolvidas;
- A taxa de dissolução no trecho que compreende a bomba é maior do que a observada no tubo.

Quanto à estimação de parâmetros e simulações:

- Os valores do coeficiente global de transferência de massa estimados para as duas abordagens utilizadas se encontram na mesma ordem de grandeza do que os encontrados na literatura. Os valores desses parâmetros encontram-se entre $4,94 \cdot 10^{-4}$ e $3,66 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ para a bomba e entre $1,43 \cdot 10^{-4}$ e $1,18 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ para a primeira abordagem e entre $5,33 \cdot 10^{-4}$ e $3,85 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ para a bomba e entre $1,53 \cdot 10^{-4}$ e $1,25 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ para a segunda abordagem;

- Os coeficientes de transferência de massa estimados para cada abordagem são semelhantes. Analisando os desvios obtidos, pode-se dizer que estes não são significativamente diferentes. Assim, as duas abordagens utilizadas são válidas para estimar o coeficiente de transferência de massa;
- O modelo proposto foi capaz de reproduzir os dados experimentais para as duas abordagens utilizadas com desvios relativos médios inferiores a 5%.

CAPITULO VI

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As seguintes sugestões podem ser consideradas para trabalhos futuros:

- Instalar mais pontos de medição de condutividade ao longo das tubulações para a aquisição de mais dados experimentais;
- Operar com bombas de maior capacidade para atingir maiores vazões volumétricas;
- Estudar os efeitos dissolutivos existentes dentro da segunda bomba de deslocamento positivo;
- Realizar experimentos a maiores concentrações;
- Realizar experimentos com fluidos não-newtonianos.

CAPITULO VII

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

AKSEL'RUD, G.A., BOIKO, A.E. & KASHCHEEV, A.E. "Kinectis of the solution of mineral salts suspended in a liquid flow". UDC 532.73-3. SPE (Society of Petroleum Engineers), 1992.

ALKATTAN, M., OELKERS E.H., DANDURAND J.L., SCHOTT J. Elsevier, "Chemical Geology", 137, 1997, p 201-219

ANDRADE, L. L. "Os Evaporitos de Sergipe (Geologia, Exploração e Industrialização)". Pontifical Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Química. Rio de Janeiro, 1980.

AMERICAN OF PETROLEUM INSTITUTE – API. Drilling fluids handbook. Houston-Texas, 2001.

BAKER HUGHES. Drilling engineering workbook. Houston, 1995.

BARRETT, B.; BOUSE, E.; CARR, B.; DEWOLFE, B.; GROWCOCK, F.; HARVEY, T.; HASTON, J.; KARGL, M.; LEE, T. H.; LINE, B.; MEHTA, H.; MERRILL, J.; MORGAN, M. C.; MORGENTHALER, M.; PEARD, N. S.; PIPER, W.; REHM, B.; RICHARDS, M.; ROBINSON, L.; STEEN, W.; STEFANOV, M. Drilling Fluids Processing Handbook. England, Elsevier Scientific Publishing Company, 2005.

BELTRÃO, R. L. C.; SOMBRA, C. L.; LAGE, A. C. V. M.; FAGUNDES NETTO, J. R.; HENRIQUES, C. C. D. Challenges and New Technologies for the Development of the Pre-salt Cluster, Santos Basin, Brazil. *In*: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, OTC 19880, Houston, USA, 4–7, p. 4-7, Maio, 2009.

BINGHAM, C. Fluidity and plasticity. Mcgraw Hill Company: New York, 1922.

BIRD, R.B., STEWART, W.E. & LIGHTFOOT, E.N. "Transport Phenomena." Second Edition. Chemical Engineering Department. University of Wisconsin-Madison, 2002.

BOURGOYNE JR, A. T., MILLHEIM, K. K., CHENEVERT, M. E., YOUNG JR, F. S. "Applied drilling engineering". Second printing, Society of petroleum engineers, Richardson, Texas, 1991.

BRAGA, E. R. "Estudo do escoamento de fluidos de perfuração em dutos e em regiões anulares". Dissertação de mestrado, UFRRJ, 2009

CARVALHO, A. L. Estudo dos fluidos de perfuração e seus impactos relacionados às atividades da indústria de petróleo. – Universidade Federal de Itajubá, 2005.

CARVALHO, R. Estudo da dissolução de partículas de NaCl em fluido de perfuração base aquosa viscosificado com bentonita. Dissertação de Mestrado. Instituto de Tecnologia. Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). Seropédica, 2017.

CLARK, E. P. Drilling Mud Rheology and the API recommended Measurements. *Society of Petroleum Engineers, Inc*, 2015.

CREMASCO, M. A. "Fundamentos de Transferência de Massa." 2a edição. Editora Unicamp, 2002.

DARBY, R. FORSYTH. J., 1992. Salt dissolution in drilling muds – a generalized correlation for mass transfer in non-newtonian fluids. *The Canadian journal of chemical engineering*. 70, 97-103.

DESHPANDE, A; KRISHNAN, J; KUMAR, S. Rheology of complex fluids, 2010 editorial Springer India

DHIMAN. Rheological properties & corrosion characteristics of Drilling mud additives. Dissertação de mestrado, Dalhousie University Halifax, Nova Scotia, 2012

DIÁRIO DO PRÉ-SAL, < <https://diariodopresal.wordpress.com/petroleo-e-gas/>>,

DURIE, R.W & JESSEN, F.W., “Mechanism of the Dissolution of Salt in the Formation of underground Salt Cavities”, paper spe 678, soc. Pet. Eng. J., v.4, issue 2, 1964, p. 183-190.

FORMIGLI, J. M.; PINTO, A. C. C.; ALMEIDA, A. S. Santos Basin’s Pre-Salt Reservoirs Development: The Way Ahead. *In*: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, OTC 19.953. Houston, Texas, Maio, 2009.

GANDELMAN, R. A.; TEIXEIRA, G. T.; WALDMANN, A. T. de A.; ARAGÃO, A. F. L.; REZENDE, M. S.; KERN, E.; JUNIOR, C. M. & MARTINS, A. L. Desenvolvimento de ferramenta computacional interpretadora de dados de PWD (Pressure While Drilling) em tempo real. Boletim técnico da Produção de Petróleo, Rio de Janeiro - volume 3, nº 2, 2011. P. 351-367.

MCCABE, W. Operaciones unitarias en ingeniería química, Cuarta edición, Editorial McGRAW-HILL Interamericana de España, S. A. U. 1998.

MAESTRO, Reologia de espesantes celulósicos para pinturas al agua: modelizacion y mecanismo de espessamento asociativo. Tese de doutorado, Universidad de Barcelona, Espanha 2002.

MAGALHÃES, S. C.; FONSECA, T. F.; DEMAUIR, M.; PINTO, J. C.; CALÇADA, L. A.; SCHEID, C. M. “Determinação do Coeficiente de Transferência de Massa do Cloreto de Sódio em Água em Sistemas Agitados”. ENEMP, 2011.

MARTINS, L. A. A. Modelagem e Determinação do Coeficiente Convectivo de Transferência de Massa de Partículas de NaCl no Escoamento de Salmoura. Dissertação de Mestrado. Instituto de Tecnologia. Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). Seropédica, 2014.

MASSARANI, G., “Fluidodinâmica em Sistemas Particulados”, Vol. 1, 2ª Edição, 2002.

MACHADO, J. C. V. Reologia e Escoamento de Fluidos, Ênfase na Indústria do Petróleo. Editora Interciência. Rio de Janeiro, 2002.

MEDEIROS, F. A. S. “Análise do Comportamento de Colunas de Revestimento Frente à Movimentação do Sal em Poços de Petróleo”. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, 1999.

MENESES, J. P. C. H. Estudo da Dissolução de Partículas de NaCl em Fluidos não-Newtonianos. Dissertação de Mestrado. Instituto de Tecnologia. Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). Seropédica, 2016.

MIELNIK, O. *et al.* “Exploração e produção de petróleo em águas ultra-profundas: nova fronteira para o pós-crise”. Fundação Getúlio Vargas. FGV Projetos. Rio de Janeiro, 2009.

MORAIS, J. M. de. Petróleo em águas profundas: uma história tecnológica da Petrobras na exploração e produção offshore. IPEA: Petrobras, Brasília, 2013.

OLIVEIRA, J. E.; IDAGAWA, L. S.; NOGUEIRA, E. C. “Evaporitos na Bacia de Campos, Aspectos Geológicos e Problemas de Perfuração”. PETROBRAS/CENPES-475, 1985.

PATRÃO, W. C. F. “Estudo teórico e experimental da dissolução de partículas de NaCl no escoamento em salmoura.” Dissertação de mestrado, UFRRJ, 2012.

PDVSA. Manual de fluidos de perforación. Centro Internacional de Educación y Desarrollo (CIED). Venezuela, 2002.

PETROBRAS. Disponível em:<<http://www.petrobras.com.br/presal>>. Acesso em: 15 jun. 2017, 15:00:00.

ROA, T. (rev.) Curso técnico de la industria petrolera. Oilwatch: Colombia, 1999.

RODRIGUES, L. Exploratory assesment of the economic gains of a pre-salt oil field in Brazil, *Energy Policy*, v. 87, p. 486-495, São Paulo, 2015.

SENA-COLOMBIA. Operación y mantenimiento de pozos profundos. Ministerio de desarrollo económico: Colombia, 1999.

SIMON, B. Dissolution Rates of NaCl and KCl in Aqueous Solution. *Journal of Crystal Growth*, v. 52, p. 789-794, France, 1981.

THOMAS, J. E. Fundamentos de Engenharia de Petróleo. 2. ed. Editora Interciência, 2004.

YERGIN, D. O Petróleo - Uma história mundial de conquistas, poder e dinheiro. São Paulo: Editora Paz e Terra, 2010.

ANEXO A

Determinação da densidade do sólido (NaCl)

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$$

Massa do recipiente vazio

$$m_r = 64,190 (g)$$

Volume do recipiente

$$V_r = 100 (ml)$$

Densidade de parafina.

$$\rho_p = 0,81 \left(\frac{g}{ml} \right)$$

Cálculo da densidade de sal.

Cálculo da massa de sal

$$m_t = m_s + m_r$$

$$m_s = m_t - m_r$$

$$m_s = 128,86 - 64,190$$

$$m_s = 64,67 (g)$$

Cálculo do volume de sal

$$V_s = V_t - V_p$$

Cálculo de volume de parafina

$$m_{t3} = m_{t2} - m_p$$

$$m_p = m_{t3} - m_{t2}$$

$$m_p = 185,664 - 128,86$$

$$m_p = 53,593 (g)$$

$$V_p = \frac{m_p}{\rho_p}$$

$$V_p = \frac{56,804}{0,81}$$

$$V_p = 70,128 \text{ [ml]}$$

$$V_s = 100 - 70,128$$

$$V_s = 29,872 \text{ (ml)}$$

Cálculo da densidade de sal

$$\rho_s = \frac{64,67}{29,872}$$

$$\rho = 2,165 \left(\frac{g}{ml} \right)$$

ANEXO B

Curvas de calibração a 30°C e 35°C

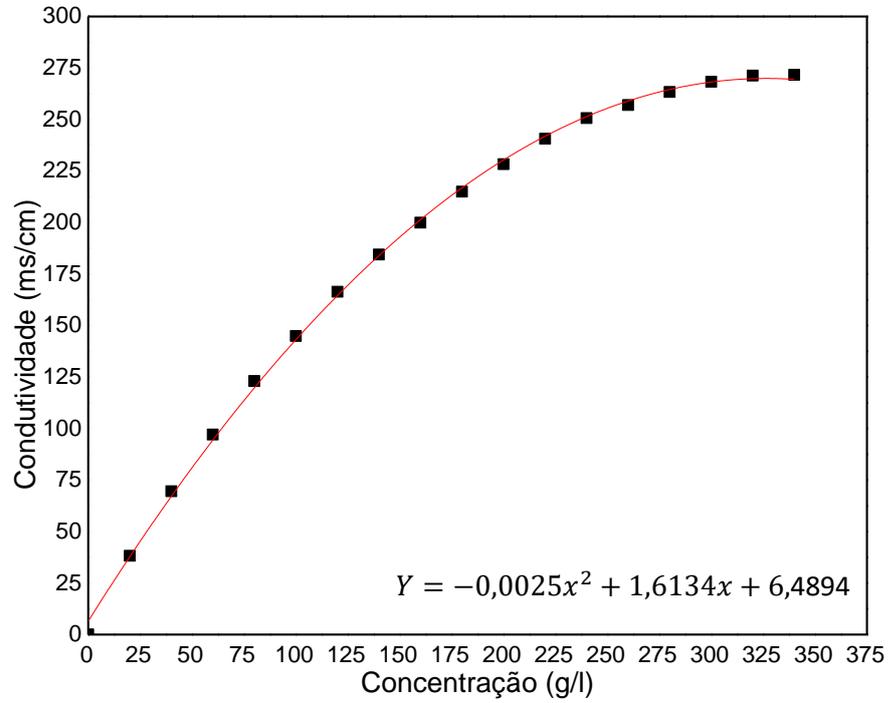


Figura 63 – Curva de calibração a 30 °C

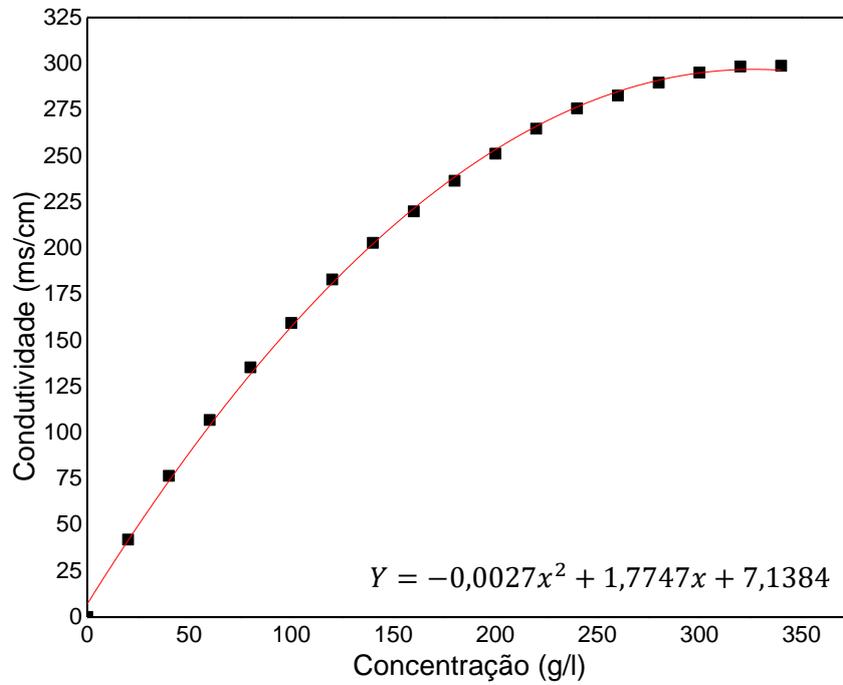


Figura 64 – Curva de calibração a 35 °C

ANEXO C

Tabelas com desvios relativos dos experimentos

Concentração de 0 (g/L)

Posição (m)	C _{exp} (g/L)	C _{sim} - D _{pvar} (g/L)	Desvio relativo (%)	C _{sim} (g/L)	Desvio relativo (%)
1,35	19,04	17,09	10,26	17,18	9,75
3,51	22,44	21,41	4,59	20,67	7,89
5,67	24,63	24,75	-0,49	23,36	5,16

Tabela 30 – Cálculo dos desvios relativos para o experimento 1.

Posição (m)	C _{exp} (g/L)	C _{sim} - D _{pvar} (g/L)	Desvio relativo (%)	C _{sim} (g/L)	Desvio relativo (%)
1,35	10,23	10,42	-1,84	10,50	-2,59
3,51	12,88	14,39	-11,66	14,13	-9,66
5,67	15,22	17,73	-16,49	17,12	-12,48

Tabela 31 – Cálculo dos desvios relativos para o experimento 4.

Posição (m)	C _{exp} (g/L)	C _{sim} - D _{pvar} (g/L)	Desvio relativo (%)	C _{sim} (g/L)	Desvio Relativo (%)
1,35	8,13	8,14	-0,11	8,33	-2,43
3,51	11,96	11,41	4,63	11,42	4,48
5,67	14,25	14,29	-0,28	14,09	1,13

Tabela 32 – Cálculo dos desvios relativos para o experimento 7.

Posição (m)	C _{exp} (g/L)	C _{sim} - D _{pvar} (g/L)	Desvio relativo (%)	C _{sim} (g/L)	Desvio relativo (%)
1,35	3,20	4,10	-27,95	4,19	-31,03
3,51	4,88	5,75	-17,85	5,76	-17,94
5,67	5,90	7,21	-22,11	7,11	-20,42

Tabela 33 – Cálculo dos desvios relativos para o experimento 10.

Posição (m)	C _{exp} (g/L)	C _{sim} - D _{pvar} (g/L)	Desvio relativo (%)	C _{sim} (g/L)	Desvio relativo (%)
1,35	27,58	28,19	-2,19	27,71	-0,47
3,51	34,79	37,62	-8,13	35,97	-3,39
5,67	40,12	44,93	-11,98	42,22	-5,22

Tabela 34 – Cálculo dos desvios relativos para o experimento 13.

Concentração de 32 (g/L)

Posição (m)	C _{exp} (g/L)	C _{sim} - D _{pvar} (g/L)	Desvio relativo (%)	C _{sim} (g/L)	Desvio relativo (%)
1,35	50,02	47,64	4,75	47,69	4,66
3,51	52,63	51,17	2,77	50,72	3,63
5,67	55,25	54,10	2,08	53,00	4,07

Tabela 35 – Cálculo dos desvios relativos para o experimento 2.

Posição (m)	C _{exp} (g/L)	C _{sim} - D _{pvar} (g/L)	Desvio relativo (%)	C _{sim} (g/L)	Desvio relativo (%)
1,35	41,54	40,20	3,23	40,29	3,02
3,51	43,16	43,43	-0,62	43,41	-0,58
5,67	45,74	46,25	-1,11	46,08	-0,74

Tabela 36 – Cálculo dos desvios relativos para o experimento 5.

Posição (m)	C _{exp} (g/L)	C _{sim} - D _{pvar} (g/L)	Desvio relativo (%)	C _{sim} (g/L)	Desvio relativo (%)
1,35	40,87	38,35	6,17	38,49	5,82
3,51	42,55	40,95	3,76	41,08	3,45
5,67	45,13	43,28	4,11	43,38	3,89

Tabela 37 – Cálculo dos desvios relativos para o experimento 8.

Posição (m)	C _{exp} (g/L)	C _{sim} - D _{pvar} (g/L)	Desvio relativo (%)	C _{sim} (g/L)	Desvio relativo (%)
1,35	37,52	35,19	6,22	35,27	6,00
3,51	38,48	36,50	5,14	36,57	4,96
5,67	40,03	37,67	5,90	37,73	5,75

Tabela 38 – Cálculo dos desvios relativos para o experimento 11.

Posição (m)	C _{exp} (g/L)	C _{sim} - D _{pvar} (g/L)	Desvio relativo (%)	C _{sim} (g/L)	Desvio relativo (%)
1,35	54,05	54,62	-1,06	54,39	-0,63
3,51	61,40	62,67	-2,06	61,88	-0,79
5,67	65,53	69,30	-5,75	67,88	-3,59

Tabela 39 – Cálculo dos desvios relativos para o experimento 14.

Concentração de 64 (g/L)

Posição (m)	C _{exp} (g/L)	C _{sim} - D _{pvar} (g/L)	Desvio relativo (%)	C _{sim} (g/L)	Desvio relativo (%)
1,35	77,89	75,46	3,12	75,16	3,51
3,51	80,75	79,03	2,13	78,58	2,69
5,67	83,25	82,05	1,44	81,41	2,21

Tabela 40 – Cálculo dos desvios relativos para o experimento 3.

Posição (m)	C _{exp} (g/L)	C _{sim} - D _{pvar} (g/L)	Desvio relativo (%)	C _{sim} (g/L)	Desvio relativo (%)
1,35	72,04	70,58	2,03	70,66	1,92
3,51	72,85	73,46	-0,84	73,58	-1,00
5,67	76,08	76,01	0,09	76,12	-0,05

Tabela 41 – Cálculo dos desvios relativos para o experimento 6.

Posição (m)	C _{exp} (g/L)	C _{sim} - D _{pvar} (g/L)	Desvio relativo (%)	C _{sim} (g/L)	Desvio relativo (%)
1,35	71,48	69,06	3,38	69,18	3,21
3,51	72,06	71,35	0,99	71,55	0,72
5,67	75,61	73,40	2,92	73,66	2,58

Tabela 42 – Cálculo dos desvios relativos para o experimento 9.

Posição (m)	C _{exp} (g/L)	C _{sim} - D _{pvar} (g/L)	Desvio relativo (%)	C _{sim} (g/L)	Desvio relativo (%)
1,35	69,27	66,74	3,66	66,49	4,02
3,51	69,49	67,88	2,32	67,57	2,76
5,67	71,44	68,90	3,55	68,57	4,01

Tabela 43 – Cálculo dos desvios relativos para o experimento 12.

Posição (m)	C _{exp} (g/L)	C _{sim} - D _{pvar} (g/L)	Desvio relativo (%)	C _{sim} (g/L)	Desvio relativo (%)
1,35	83,69	83,65	0,05	82,33	1,63
3,51	91,84	90,63	1,31	89,55	2,50
5,67	96,16	96,55	-0,41	95,45	0,73

Tabela 44 – Cálculo dos desvios relativos para o experimento 15.