

UFRRJ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA
TECNOLOGIA QUÍMICA

DISSERTAÇÃO

**ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DA DISSOLUÇÃO DE
PARTÍCULAS DE NaCl NO ESCOAMENTO EM SALMOURA**

WANDERSON CABRAL FERREIRA PATRÃO

2012



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

**ESTUDO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DA DISSOLUÇÃO DE
PARTÍCULAS DE NaCl NO ESCOAMENTO EM SALMOURA**

WANDERSON CABRAL FERREIRA PATRÃO

Sob a Orientação de
Cláudia Miriam Scheid

e Co-orientação de
Luís Américo Calçada

Dissertação submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Ciências** em Engenharia Química, Área de Concentração em Tecnologia Química.

Seropédica, RJ

Agosto de 2012

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

WANDERSON CABRAL FERREIRA PATRÃO

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

DISSERTAÇÃO APROVADA EM __/__/_____

Cláudia Miriam Scheid, D. Sc., DEQ/UFRRJ
(Presidente)

Marcos Antônio de Souza Barrozo, D. Sc., DEQ/UFU

Maurício Cordeiro Mancini, D. Sc., DEQ/UFRRJ

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus pela realização deste trabalho, pois sem sua permissão nada é possível.

À professora Cláudia Miriam Scheid e ao professor Luís Américo Calçada, pela orientação, dedicação e profissionalismo neste trabalho.

A todos os professores e servidores do DEQ-IT/UFRRJ, pelo suporte técnico na realização deste trabalho.

Ao CENPES por todo suporte tecnológico e pelo financiamento do projeto de pesquisa.

À minha mãe, Sônia Patrão e minha avó, Maria Cabral por todo o suporte e apoio dado para o sucesso deste trabalho.

A Ana Clara Dias por todo o apoio, dedicação, companheirismo e a compreensão nos momentos difíceis.

À aluna de graduação Renata da Conceição Silva e ao Sr. Elias, técnico do laboratório de escoamento de fluidos (LEF), pela ajuda para coletar os dados experimentais, montagem e manutenção da unidade experimental.

Aos grandes e verdadeiros amigos Luiz Henrique, Fabrício Gardingo, Ramon Gabriel, Fagner Calegário, Gabriel Anastácio, Sérgio Magalhães, Felipe Eler, Felipe Arantes, Marcela Galdino, Wagner Leandro e Skarlet Toledo pela amizade, companheirismo e pelos bons momentos vividos na universidade.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, pelos grandes momentos vividos e todo conhecimento adquirido.

RESUMO

PATRÃO, Wanderson Cabral Ferreira. **Estudo Teórico e Experimental da Dissolução de Partículas de NaCl no Escoamento em Salmoura**. 2012. 91p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química, Tecnologia Química). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2012.

Com o início da exploração dos reservatórios da camada pré-sal, problemas técnicos têm sido encontrados durante a perfuração da formação geológica, onde cascalhos de sal são gerados e invadem a região anular do poço. Durante a invasão, o particulado gerado é transportado em suspensão para a superfície, tendendo naturalmente dissolver-se no fluido de perfuração. Esta dissolução acarreta alterações nas propriedades físico-químicas e reológicas do fluido prejudicando o controle de todo processo operacional. Dentro desse contexto foi construída uma unidade experimental que permite a dissolução de partículas de NaCl em suspensão durante o escoamento em salmoura. Tomadas de concentração foram dispostas ao longo da estrutura, permitindo o levantamento experimental do perfil de concentração em diferentes condições operacionais. Para este estudo ainda foi avaliado um modelo matemático capaz de prever a dissolução de partículas salinas suspensas durante no escoamento em salmoura. O modelo proposto consiste em um sistema de três equações diferenciais parciais (EDP's), considerando o balanço de massa de sal na fase líquida, o balanço de massa de sal na fase sólida e o balanço global de energia para a mistura (sólido/solução). Para que esse sistema fosse solucionado, primeiramente foi necessária a estimação do coeficiente global de transferência de massa para que posteriormente fosse realizada a simulação dos dados. Os dados simulados foram confrontados com os dados obtidos experimentalmente e observou-se um desvio máximo de 8,2%. O modelo matemático foi validado através de um ensaio realizado em triplicata fora da malha experimental, uma vez que o modelo conseguiu prever de maneira satisfatória os dados experimentais utilizando o coeficiente global de transferência de massa estimado através da malha experimental. A eficácia do modelo estudado foi comprovada pelos baixos desvios obtidos, com um desvio máximo de 6%.

Palavras chave: Pré-sal, perfuração e dissolução.

ABSTRACT

PATRÃO, Wanderson Cabral Ferreira. **Experimental and Theoretical Study of NaCl Particles Dissolution in Flow Brine**. 2012. 91p. Dissertation. (Master Science in Chemical Engineering, Chemical Technology). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica , RJ, 2012.

With the start of operation of reservoirs of pre-salt layer, technical problems have been encountered during drilling of geological formation, where cuttings salt are generated and invade the annular region of the well. During invasion, the particles generated are transported in suspension to the surface, tending naturally to dissolve into the drilling fluid. This dissolution leads to changes the physico-chemical and rheological properties of the fluid, impairing control of the entire operational process. Within this context an experimental unit was built which allows the dissolution of NaCl particles in suspension during flow in brine. Concentration were taken arranged along the structure, allowing the lifting of the experimental concentration profile at different operating conditions. For this study still was evaluated a mathematical model able to predict the dissolution of salt particles suspended during flow in brine. The proposed model consists in a system of three partial differential equations (PDE's), considering the mass balance of salt in liquid phase, the mass balance of salt in solid phase and the overall energy balance for the mixture (solid / solution). The simulated data are compared with obtained experimentally data and it was observed that the model studied was shown satisfactory due to low deviations obtained, and lower than 10%.

Keywords: pre-salt, drilling and dissolution

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DA LITERATURA	3
2.1 A origem do petróleo	3
2.2 Perfuração	6
2.3 A importância do fluido no processo de perfuração	9
2.4 Formações salinas	10
2.5 A camada pré-sal no Brasil	12
2.6 Cenário atual do petróleo no Brasil	15
2.7 Componentes e formação do pré-sal.....	15
2.8 Os desafios do pré-sal	17
2.9 A velocidade de dissolução salina	20
2.10 Transferência de Massa.....	20
2.10.1 Difusão versus convecção mássica	21
2.10.2 Coeficiente global de transferência de massa	22
2.10.3 Modelos para o coeficiente de transferência de massa	23
2.10.4 Equação da continuidade em transferência de massa	23
2.11 Cinética de dissolução.....	24
3. MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1 Homogeneização e estocagem do sal.....	30
3.2 Medidas de concentração	32
3.3 Procedimento experimental	33
3.4 A secagem do sal	36
3.5 Construção da malha de experimentos	37
4. MODELAGEM E RESOLUÇÃO NUMÉRICA	38
4.1 Modelagem da dissolução de NaCl no escoamento em salmoura	38
4.2 Resolução numérica	40
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1 Resultado da análise granulométrica.....	44
5.2 Determinação da concentração	45
5.3 Resultados da umidade inicial de sal	46
5.4 Resultados obtidos da unidade de secagem do sal via processo convectivo.....	47
5.5 Determinação da área da seção transversal ao fluxo (A_{esc})	47
5.6 Resultados do fator de dissolução	51
5.7 Resultados para as tomadas de concentração.....	52
5.8 Estimação do coeficiente global de transferência de massa	54
5.9 Resultados da simulação computacional	56
5.10 Resultados para a validação do modelo	60
6. CONCLUSÕES	64
7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	65
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
ANEXO I (DADOS FÍSICO-QUÍMICOS)	70

ANEXO II (DADOS EXPERIMENTAIS)	72
II.1 Experimento 1	73
II.2 Experimento 2	75
II.3 Experimento 3	77
II.4 Experimento 4	79
II.5 Experimento fora da malha experimental	81
ANEXO III (DADOS SIMULADOS)	83
III.1 Simulação do experimento 1	84
III.2 Simulação do experimento 2.....	85
III.3 Simulação do experimento 3.....	86
III.4 Simulação do experimento 4.....	87
III.5 Simulação do experimento fora da malha experimental.....	88

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: Migração do petróleo da rocha geradora para rochas reservatório.....	4
FIGURA 2: Dobradura da camada de rocha.....	5
FIGURA 3: Seção transversal de um reservatório de falha.....	5
FIGURA 4: Seção de uma estrutura de cúpula de sal	6
FIGURA 5: Esquema básico de uma sonda de perfuração.....	7
FIGURA 6: Processo de perfuração	9
FIGURA 7: Escoamento em região anular.....	10
FIGURA 8: Modelo de bacia de sedimentação.....	11
FIGURA 9: Maiores depósitos globais de sais estão indicados pelas áreas brancas.....	11
FIGURA 10: União entre o continente americano e africano	13
FIGURA 11: Distância entre a lâmina de água e o reservatório	13
FIGURA 12: Rocha reservatório do pré-sal	14
FIGURA 13: Revestimento de aço e cimento especial	17
FIGURA 14: Desafios na perfuração de poços em seções de sal.....	18
FIGURA 15: Aparato experimental para determinação do coeficiente de liberação de massa de partículas suspensas em um fluxo líquido	24
FIGURA 16: Desenho esquemático da unidade experimental de escoamento de sais vista superior.....	28
FIGURA 17: Visão lateral do esquema da unidade de escoamento.....	28
FIGURA 18: Esquema da unidade de escoamento.....	29
FIGURA 19: Foto da unidade experimental de escoamento de sais vista lateral parcial.....	29
FIGURA 20: Foto da unidade experimental de escoamento de sais vista superior.....	30
FIGURA 21: Foto da massa total de sal.....	30
FIGURA 22: Foto da aplicação da técnica de quarteamento	31
FIGURA 23: Foto da estocagem das amostras.....	31
FIGURA 24: Agitador de peneiras	32
FIGURA 25: Análise granulométrica da amostra	32
FIGURA 26: Foto do condutivímetro utilizado na determinação da concentração	32
FIGURA 27: Laboreto posicionado em uma das janelas operacionais.....	33
FIGURA 28: Foto do laboreto.....	33
FIGURA 29: Foto do posicionamento das tomadas de concentração	34
FIGURA 30: Foto da extremidade interna da tomada de concentração	35
FIGURA 31: Tela de recolhimento de sal mesh 100.....	35
FIGURA 32: Esquema da unidade de secagem do sal por convecção.....	36
FIGURA 33: Foto da unidade de secagem do sal por convecção	36
FIGURA 34: Análise granulométrica típica das amostras	45
FIGURA 35: Curva de calibração para determinação da concentração	46
FIGURA 36: Perímetro molhado para a vazão de 1,0 L/s.....	48
FIGURA 37: Perímetro molhado para a vazão de 2,0 L/s.....	48
FIGURA 38: Esquema geométrico para a realização dos cálculos	49
FIGURA 39: Dados experimentais e simulados de concentração de sal em função da posição	56

FIGURA 40: Comparação entre a concentração obtida experimentalmente e a dada pela simulação.....	58
FIGURA 41: Desvio relativo da concentração obtida pela simulação em comparação com os dados experimentais	58
FIGURA 42: Resultados obtidos para a simulação dos dados de fração volumétrica de sólidos em função da posição	59
FIGURA 43: Resultados obtidos para a simulação dos dados de temperatura em função da posição	60

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1: Principais constituintes da água do mar	16
TABELA 2: Coeficiente de liberação de massa (k).....	25
TABELA 3: Malha experimental	37
TABELA 4: Condições iniciais e condições de alimentação para cada variável	42
TABELA 5: Dados físico-químicos utilizados no modelo matemático	43
TABELA 6: Diâmetro médio de Sauter das amostras avaliadas	44
TABELA 7: Teste da umidade inicial presente nas amostras salinas.....	46
TABELA 8: Verificação da massa de água ainda presente nas amostras após secagem dinâmica.	47
TABELA 9: Resultados da área transversal ao escoamento.....	50
TABELA 10: Resultado para o fator de dissolução (FD).....	51
TABELA 11: Teste ANOVA realizado para as variáveis Q e W em triplicata.....	52
TABELA 12: Dados de tomada de concentração ao longo da posição para o experimento 1 em triplicata	52
TABELA 13: Teste ANOVA realizado para o experimento 1 em triplicata.....	53
TABELA 14: Teste t realizado para os pares de amostras de concentração do experimento 1 ao longo da posição	53
TABELA 15: Resultado das tomadas de concentração em cada posição para os quatro experimentos.....	54
TABELA 16: Número de Reynolds para cada condição de vazão volumétrica.....	55
TABELA 17: Valor estimado do coeficiente global de transferência de massa.....	55
TABELA 18: Desvios entre as concentrações experimentais e as concentrações dadas pela simulação	57
TABELA 19: Resultados do fator de dissolução (FD) para o experimento fora da malha.	61
TABELA 20: Dados da tomada de concentração ao longo da posição para o experimento fora da malha experimental em triplicata.....	61
TABELA 21: Desvios entre as concentrações experimentais e as concentrações dadas pela simulação para os dados fora da malha experimental..	63

1 INTRODUÇÃO

A exploração dos reservatórios de petróleo da camada pré-sal exigem grandes desafios tecnológicos, visto as dificuldades técnicas encontradas nessa região. Um dos principais problemas encontrados é que durante a perfuração da formação geológica, cascalhos de sal são gerados e invadem a região anular. Esses cascalhos são transportados em suspensão para a superfície e tendem a se dissolver naturalmente no fluido de perfuração. Esta dissolução, além de acarretar alterações nas propriedades físico-químicas e reológicas do fluido, promove também o alargamento da parede e conseqüentemente o colapso ou até mesmo a perda do poço (SILVA, 2006).

Uma das formas de minimizar os efeitos da dissolução salina é o emprego de fluido sintético, porém seu elevado custo, seu grau de agressividade ao ambiente e a dificuldade que causa na avaliação de formações limitam sua aplicação (SILVA, 2006).

Em algumas ocasiões costuma-se utilizar água do mar como fluido de perfuração para explorar pequenos trechos de camada salina, uma vez que com a sua circulação o fluido torna-se saturado diminuindo o alargamento da parede do poço. Além disso, a água do mar não promove nenhum tipo de agressão ambiental e reduz de maneira significativa os custos durante a perfuração das zonas salinas (WILSON, 2004). Para que o controle deste processo seja implementado, primeiramente faz-se necessário o pleno conhecimento do fenômeno dissolutivo (COSTA, 2000).

Para se obter maior conhecimento sobre os efeitos da dinâmica de dissolução de sais foi construída uma unidade experimental, onde partículas de NaCl escoavam suspensas em salmoura, permitindo avaliar o comportamento da dissolução de partículas salinas frente a mudanças nas condições operacionais. Através de tomadas de concentração posicionadas ao longo da linha de escoamento, pode-se fazer um levantamento experimental do perfil de concentração ao longo da estrutura de escoamento, a fim de validar um modelo matemático que descreve a dissolução de partículas salinas durante o escoamento em salmoura.

Neste trabalho, o capítulo 2 descreve a formação de rochas geradoras de petróleo, a origem da camada pré-sal no Brasil e os seus desafios. Também é apresentada uma revisão bibliográfica sobre transferência de massa e alguns modelos para a cinética de dissolução.

No capítulo 3 está descrita a unidade experimental de dissolução de partículas de NaCl durante o escoamento em salmoura, assim como metodologia adotada para a realização dos experimentos.

No capítulo 4 são apresentadas a modelagem e a solução do sistema de equações utilizadas na simulação computacional que prevê a dissolução salina durante o escoamento em salmoura.

No capítulo 5 são apresentados os resultados experimentais da concentração de sal no fluido ao longo da estrutura de escoamento, os resultados obtidos da estimação do coeficiente convectivo de transferência de massa, os resultados da simulação

computacional da dissolução de sal descrita pelo sistema de equações diferenciais parciais e os resultados obtidos para a validação do modelo.

O capítulo 6 diz respeito às conclusões obtidas para os resultados experimentais e acerca dos resultados obtidos para a o modelo de dissolução de sais, utilizando o coeficiente estimado para os dados da malha experimental e os dados fora da malha experimental.

Por fim o capítulo 7 apresenta as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 A origem do petróleo

A idade do nosso planeta é calculada em bilhões de anos. As jazidas de petróleo, não tão antigas, variam de um a quatrocentos milhões de anos.

Durante esse período, aconteceram grandes e inúmeros fenômenos, como erupções vulcânicas, deslocamento dos pólos, separação dos continentes, movimentação dos oceanos e ação dos rios, acomodando a crosta terrestre. Com isso, grandes quantidades de restos vegetais e animais se depositaram no fundo dos mares e lagos, sendo soterrados pelos movimentos da crosta terrestre sob a pressão das camadas de rochas e pela ação do calor. Esses restos orgânicos foram se decompondo até se transformarem em petróleo.

A interação dos fatores matéria orgânica, sedimento e condições termoquímicas apropriadas é fundamental para o início da cadeia de processos que leva à formação do petróleo. A matéria orgânica proveniente de vegetais superiores também pode dar origem ao petróleo, todavia sua preservação torna-se mais difícil em função do meio oxidante onde vivem (THOMAS, 2004).

Como resultado da erosão da crosta terrestre pela ação da natureza formaram-se detritos de rochas comumente chamados de sedimentos, que ao se acumularem em camadas ao longo dos tempos deram origem às rochas sedimentares. As diversas camadas dessas rochas formam as bacias sedimentares, que são áreas que acumulam sedimentos durante um determinado tempo (CHAPMAN, 1983).

Estas transformações acontecem em diferentes etapas e fases, sendo a primeira denominada de diagênese (degradação bioquímica da matéria orgânica pela atividade de microorganismos, a qual ocorre a baixas profundidades e temperaturas, normalmente até 1.000 m e 50 °C respectivamente). Como resultado tem-se a formação do querogênio, definido como a fração insolúvel da matéria orgânica presente nas rochas sedimentares, responsável pela formação dos hidrocarbonetos. Durante o processo de formação do petróleo, o querogênio sofre uma série de mudanças responsáveis por definir a sua qualidade (AHMED, 2000).

Com o tempo e a evolução dos processos geológicos, verifica-se a ocorrência de subsidências, caracterizadas como submersão de determinadas superfícies terrestres. Ocorrência causada normalmente por atividades tectônicas e movimentação de fluidos, neste processo, a superfície se movimenta para baixo do nível do mar, sendo então sobreposta pelas formações adjacentes. Desta maneira, na bacia sedimentar, o querogênio é soterrado a maiores profundidades, se associando às rochas geradoras. Sendo submetido a um processo de adaptação às novas pressões e temperaturas locais, o querogênio passa por uma série de transformações, produzindo diferentes compostos como dióxido de carbono, água, gás sulfídrico (H₂S), hidrocarbonetos (C_mH_n), etc. Sequencialmente, passa-se para o processo de catagênese, onde o querogênio é submetido a temperaturas da ordem de 50 a 150 °C, resultando na formação sucessiva de óleo, condensado (hidrocarboneto existente

na forma de vapor nos reservatórios) e gás úmido (mistura de hidrocarbonetos e outros gases, normalmente com uma alta concentração de C_5+H_n). Na fase seguinte tem-se a metagênese, fase em que os compostos até o momento gerados e acumulados são submetidos a temperaturas ainda maiores, 150 a 200 °C, gerando então o chamado gás seco (composto gasoso com alta concentração de metano, CH_4) e um resíduo carbonoso (AHMED, 2000).

Essas reações, seguidas do processo de progressiva compactação mineral e expansão volumétrica das rochas, tem-se um considerável aumento da pressão entre a rocha geradora e as camadas adjacentes, favorecendo a formação de microfaturas, processo responsável por permitir a expulsão do petróleo da rocha geradora, e geologicamente denominado de migração primária (Figura 1).

Sequencialmente denominada de migração secundária, tem-se o deslocamento do petróleo da rocha geradora para as rochas reservatório (também conhecidas como rochas acumuladoras). Estas últimas são conhecidas por possuírem uma elevada porosidade, necessária para permitir o influxo do fluido migrante, sendo então o local final de armazenamento do petróleo. Uma vez que as rochas reservatório devem possuir uma considerável porosidade, estas poderiam permitir a contínua migração do petróleo gerado para formações adjacentes, (NASCIMENTO, 2010).

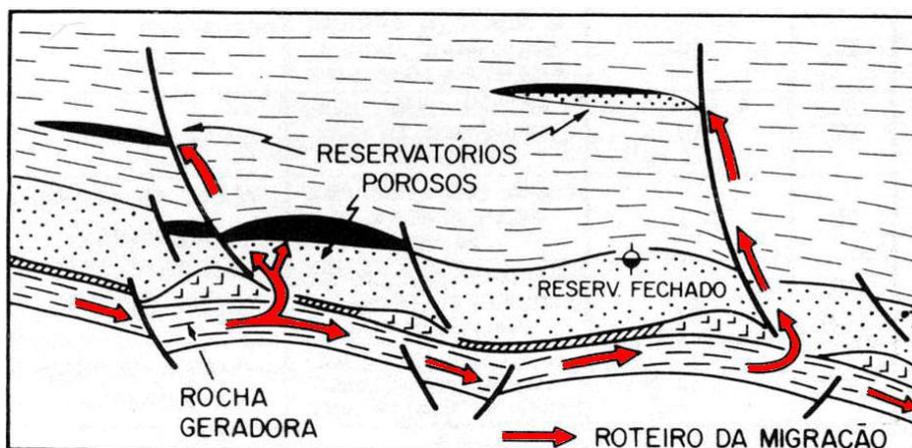


Figura 1-Migração do petróleo da rocha geradora para rochas reservatório. (HAWKINS *et al.*, 1991).

Nesse momento, verifica-se a importância das rochas selantes (*seal rock*) ou rochas de cobertura/capeadora (*cap rock*). Localizadas sobrepostas às rochas reservatório, possuem baixa permeabilidade (capacidade de um corpo de permitir a passagem de um fluido), impedindo que o petróleo continue a migrar (SACHSENHOFER, 2009).

Segundo Thomas (2004), para se ter uma acumulação de petróleo é necessário que, após o processo de geração, ocorra a migração e que esta tenha seu caminho interrompido pela existência de algum tipo de armadilha geológica. Essas armadilhas são barreiras que impedem o movimento ascendente do petróleo, muitas vezes, uma formação rochosa tão densa que o

petróleo não pode penetrá-la. Anticlinais, falhas e cúpulas salinas são estruturas comuns de interceptação, como ilustram as figuras 2, 3 e 4. (DOE/EIA – 0545).

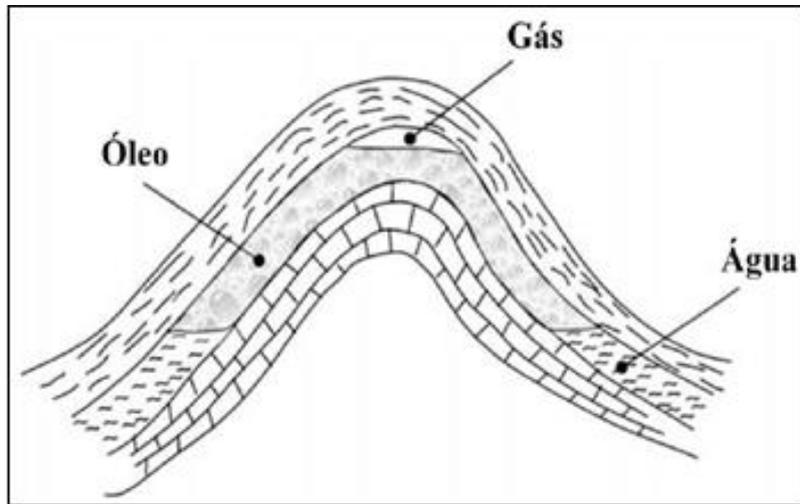


Figura 2 - Dobradura da camada de rocha (ABDEL-AAL & AGGOUR, 2003).

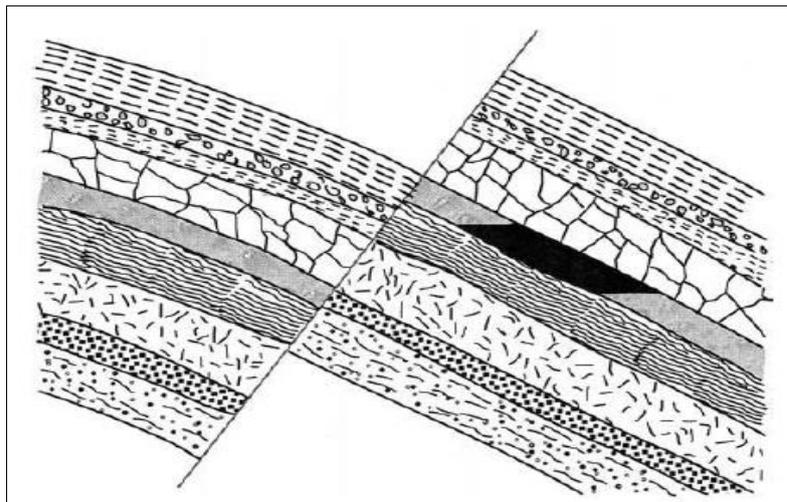


Figura 3 - Seção transversal de um reservatório de falha (ABDEL-AAL & AGGOUR, 2003).

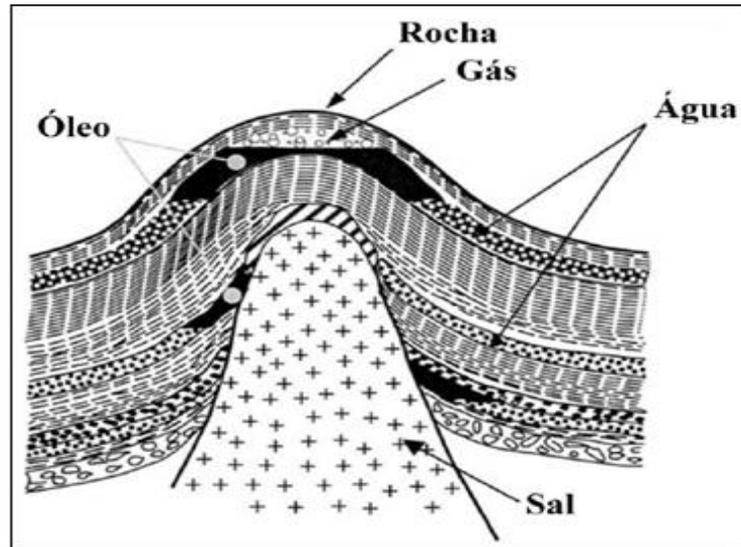


Figura 4 - Seção de uma estrutura de cúpula de sal (ABDEL-AAL & AGGOUR, 2003).

Admitindo-se diferentes bacias sedimentares, de dimensões equivalentes, contendo rochas geradoras com potenciais de geração de hidrocarbonetos também equivalentes, os volumes de petróleo a serem encontrados poderão ser os mais distintos desde volumes gigantescos em umas até insignificantes em outras, isso dependendo de seus graus de estruturação, da existência e inter-relação das armadilhas e dos contatos que essas armadilhas propiciem entre rochas geradoras e rochas reservatórios (THOMAS, 2004).

Duas das características mais importantes de rochas sedimentares são a porosidade e permeabilidade. Porosidade refere-se à relação entre o volume de vazios e o volume total da rocha e permeabilidade se refere à capacidade de um líquido fluir através da rocha, de poro a poro, de poros à fratura, ou de fratura a fratura. Uma formação com alta porosidade pode conter mais óleo em um determinado volume de rocha. Se um reservatório tem grande ligação entre os vários espaços porosos, tem boa permeabilidade (DOE/EIA – 0545).

2.2 Perfuração

Antes de dar início ao processo de perfuração, deve-se fazer uma análise geológica do local a ser perfurado para avaliar características importantes do local como relevos, tipo de solo, tipo de rocha geradora, tipo de rocha-reservatório, determinar seus limites, estudar o impacto ambiental, entre outros.

Os geólogos examinam as rochas superficiais e o terreno com a ajuda adicional de imagens de satélite. No entanto, eles também usam uma variedade de outros métodos para encontrar petróleo, como por exemplo, a sismologia, criando ondas de choque que passam através das camadas ocultas de rochas e interpretando as ondas que são refletidas de volta para a superfície (TRIGGIA *et al.*, 2001).

- | | |
|---|--|
| 01- Tanque de lama de perfuração | 15- Placa de bordo |
| 02- Agitadores de argila | 16- Suporte do duto de perfuração |
| 03- Linha de sucção de lama | 17- Suporte de tubos |
| 04- Bomba do sistema de lama | 18- Suporte giratório |
| 05- Motor | 19- Conector mesa/coluna |
| 06- Mangueira vibratória | 20- Mesa rotatória |
| 07- Guincho | 21- Superfície de perfuração |
| 08- Suporte para tubo | 22- Extremidade da conexão |
| 09- Mangueira | 23- Anular <i>BOP</i> |
| 10- Pescoço de ganso | 24- <i>Ram BOP</i> |
| 11- Catarina | 25- Linhas de perfuração |
| 12- Linha de perfuração | 26- Broca de perfuração |
| 13- Bloco de coroamento | 27- Cabeça do revestimento |
| 14- Mastro/Torre | 28- Duto de retorno da lama |

A perfuração caracteriza-se pela aplicação de peso e rotação da broca sobre o solo, e pela circulação de fluido. O peso e a rotação têm a função de destruir as rochas, já o fluido tem diversas funções, como retirar os cascalhos gerados pela broca e transportá-los para a superfície. A circulação consiste em manter o bombeio do fluido, em geral com rotação, mas sem tocar com a broca no fundo. Assim, não se tem avanço e pode-se efetuar uma melhor limpeza, retirando todo o cascalho do poço (BRAGA, 2009).

Na perfuração convencional, o poço é perfurado por um tubo cujo comprimento nominal varia de aproximadamente 5,49 metros a 16,50 metros e depois de certa profundidade outro tubo é adicionado até ter a profundidade desejada. Já na perfuração com “*top-drive*” (figura 5), há um motor conectado no topo da coluna e a perfuração é feita de seção em seção, ou seja, de três em três tubos (TRIGGIA *et al.*, 2001).

Em um poço típico “*onshore*”, primeiro crava-se no chão um condutor de 20" de diâmetro por onde descerá a broca de 12 1/4" que perfura até certa profundidade, em seguida retira-se a broca, para depois descer um revestimento de 9 5/8", para que então ocorra a cimentação.

Em um poço “*offshore*” primeiro desce uma base guia temporária de 36", onde se inicia a perfuração com uma broca de 26", em seguida retira-se a broca, desce-se o revestimento de 20", para então ocorrer a cimentação. O processo de perfuração é continuado como na situação “*onshore*” com uma broca de 8 1/2" e seus passos seguintes como mostra a figura 6 (BRAGA, 2009).

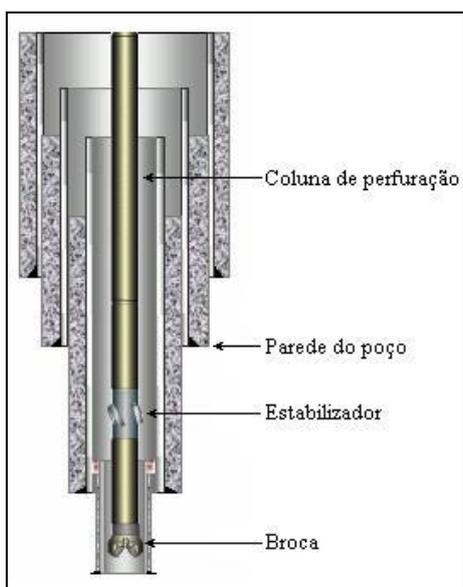


Figura 6 - Processo de perfuração (BRAGA, 2009).

O trabalho de perfuração de um poço exige uma eficiente coordenação entre as atividades e deve ser realizado de forma ininterrupta. O custo estimado para operações *onshore* é normalmente menor do que o custo para operações *offshore*, as quais têm variado para ambientes de águas ultraprofundas no Brasil, de US\$ 500 mil a US\$ 650 mil por dia (MIELNIK *et al.*, 2009).

2.3 A importância do fluido no processo de perfuração

Os fluidos de perfuração são misturas de sólidos, líquidos, e podem ter até gases. Do ponto de vista químico, eles podem assumir aspectos de suspensão, dispersão coloidal ou emulsão (BOURGOYNE *et al.*, 1991).

Os fluidos devem ser especificados de forma a garantir uma perfuração segura e rápida. Assim, é desejável que o fluido seja quimicamente estável, estabilize as paredes do poço, facilite a separação dos cascalhos na superfície, garanta segurança operacional ao meio-ambiente, seja bombeável, evite danos à formação produtora, mantenha sólidos em suspensão quando estiver em repouso, iniba a reatividade de formações argilosas, previna a corrosão da coluna e equipamentos de superfície.

Tem como principais funções limpar o fundo do poço, resfriar a broca, lubrificar a coluna de perfuração, evitar o influxo de fluidos indesejáveis “*kick*”, ajudar na perfuração por erosão (BOURGOYNE *et al.*, 1991).

As propriedades de controle dos fluidos podem ser físicas ou químicas. As propriedades físicas mais importantes e frequentemente medidas são densidade, parâmetros reológicos, forças géis, parâmetros de filtração e o teor de sólidos (TRIGGIA *et al.*, 2001).

A pressão hidrostática do poço é controlada pelo fluido de perfuração, se precisar de maior pressão no poço deve-se aumentar a densidade do fluido. Vale

ressaltar que não se deve operar com pressão maior que a pressão de fratura da rocha para evitar danos à rocha geradora.

Durante o processo de perfuração, o fluido é injetado através da coluna de perfuração em um típico escoamento em região anular conforme mostra a figura 7.

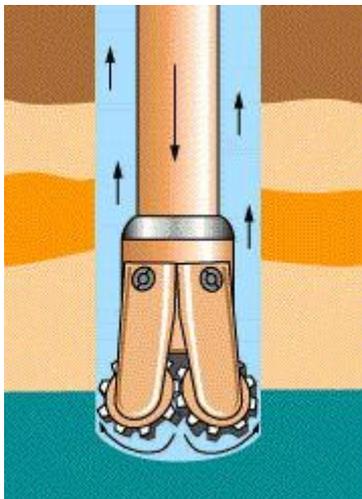


Figura 7 – Escoamento em região anular.

Depois que o fluido passa ao longo da coluna, o mesmo é ejetado pela broca e retorna à superfície na região compreendida entre a coluna de perfuração e a parede do poço, analogamente, podemos dizer que é um escoamento na região anular de dois tubos que podem ser concêntricos ou excêntricos.

2.4 Formações Salinas

A camada pré-sal, chamada também de evaporitos, é um conjunto de rochas sedimentares que apresentam camadas de minerais salinos, sendo o principal a halita, depositados diretamente de salmouras em condições de forte evaporação e precipitação de bacias de sedimentação restritas, quentes e subsidentes. Tais depósitos de sais podem ser de origem continental ou marinha em que haja aporte periódico de água salgada.

O principal ambiente de formação corresponde ao de lagunas em climas tropicais com fortes e contínuas evaporações acompanhadas de afluxo sistemático ou intermitente de água salgada do mar e com pouco ou nenhum aporte de sedimentos clássicos.

Os ambientes de formação de evaporitos ocorrem tanto em situações de caráter continental como marinho sendo este último normalmente de maior expressão (SILVA, *et al.* 2000).

Uma das principais justificativas para o acontecimento deste tipo de deposição é que o processo de evaporação ocorre na interface água-ar e não depende da profundidade da lâmina de água onde isto acontece (FREITAS, 2006). A Figura 8

mostra o acúmulo de sedimentos, a concentração de salmoura e a precipitação de sais consequentes da evaporação em um modelo de bacia de sedimentação.

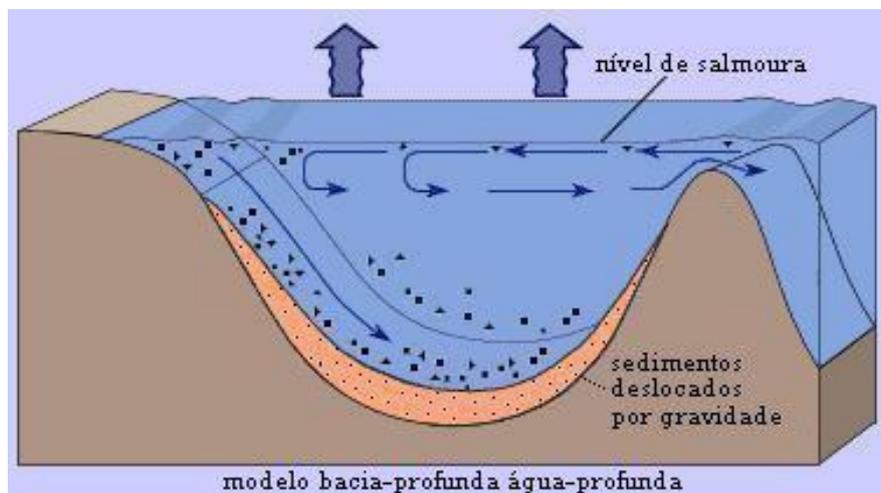


Figura 8- Modelo de bacia de sedimentação.

A precipitação do sal acontece quando o soluto atinge o ponto de saturação salina daquele componente. Desta maneira a deposição de camadas salinas ocorre em uma sequência ou sucessão de salinização progressiva da bacia de deposição, dos sais menos solúveis para os mais solúveis.

Os evaporitos são encontrados em várias bacias de hidrocarbonetos ao redor do mundo, como mostra a Figura 9. Existem depósitos significativos nas águas profundas do Golfo do México e em regiões “*offshore*” do oeste da África e Brasil, no Sul do Mar do Norte, Egito e Oriente Médio.



Figura 9 - Maiores depósitos Globais de Sais estão indicados pelas áreas brancas (FARMER *et al.*, 1996).

Billo (1996) já observava que diversas reservas de petróleo estão associadas com evaporitos em muitas áreas do mundo, contemplando bacias nos Estados Unidos (Delaware, Michigan, Paradox) e no Oriente Médio. As águas profundas da América do

Norte, do Golfo do México e da Nova Escócia (Noroeste do Canadá) já são áreas de exploração e produção de óleo e gás. Willson & Fredrich (2005) também constataram que uma significativa atividade de exploração também é o alvo de regiões “offshore” da Angola e do Brasil.

2.5 A camada pré-sal no Brasil

A região do pré-sal brasileiro, que possui gigantescas reservas de petróleo e gás, é uma sequência de rochas sedimentares depositadas há mais de 100 milhões de anos no espaço geográfico formado pela separação dos continentes Americano e Africano, que começou há 120 milhões de anos.

Há aproximadamente 135 milhões de anos, os continentes americano e africano formavam um super continente, o Gondwana. Intensas movimentações no interior da crosta terrestre causaram a divisão do Gondwana. Ao longo da fratura que se estabeleceu entre os novos continentes, desenvolveu-se uma estreita e longa bacia sedimentar, que evoluiu de um lago, onde se depositaram sedimentos ricos em matéria orgânica no seu fundo, para um golfo alongado com a entrada do mar (predecessor do Atlântico Sul). Neste golfo circulavam águas saturadas de cloreto de sódio e outros sais solúveis (OLIVEIRA *et al.*, 1985).

O processo de separação continental deu origem a golfos, anteriores a separação total (mar aberto), ao longo de toda costa atual, o que propiciou condições de restrição do fluxo de água do mar. Todo este processo, associado a condições ambientais como volume original, clima seco e quente, ventilação, evaporação, alimentações da fonte de água e restrição morfológica, foram favoráveis para formação de depósitos evaporíticos no litoral brasileiro. Assim, a espessa camada de sal encontrada hoje na margem continental brasileira, recobre sedimentos lacustres e transicionais que geraram o petróleo e o gás natural, presentes nas bacias sedimentares do Sudeste brasileiro (OLIVEIRA *et al.*, 1985). A figura 10 representa a união entre os dois continentes ao longo de milhões de anos.

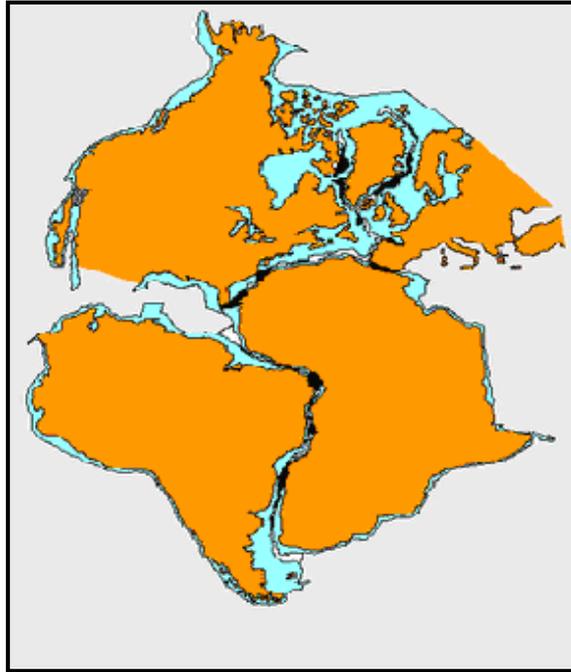


Figura 10 - União entre o continente americano e africano.

A província do pré-sal compreende uma área de 112 mil quilômetros quadrados, que vai do litoral do Espírito Santo ao de Santa Catarina. O termo pré-sal refere-se a um conjunto de rochas localizadas nas porções marinhas de grande parte do litoral brasileiro, com potencial para a geração e acúmulo de petróleo. Convencionou-se chamar de pré-sal porque forma um intervalo de rochas que se estende por baixo de uma extensa camada de sal, que em certas áreas da costa atinge espessuras de até 2.000 metros. O termo pré é utilizado porque, ao longo do tempo, essas rochas foram depositadas antes da camada de sal. De acordo com Nascimento (2010) a profundidade total dessas rochas, que é a distância entre a superfície do mar e os reservatórios de petróleo abaixo da camada de sal, pode chegar a mais de 7.000 metros, como mostra a figura 11.



Figura 11 - Distância entre a lâmina de água e o reservatório.

Costa *et al.* (2005) analisaram a geologia típica da bacia de Campos, onde a espessa camada de halita (NaCl) a ser perfurada está no intervalo de 2324 a 3034 metros abaixo do fundo do mar ou no intervalo entre 3720 a 4430 metros em relação ao equipamento de perfuração. Outros estudos foram realizados na Bacia de Santos por Poiate *et al.* (2006) com o objetivo de planejar a exploração de poços em águas ultraprofundas com lâmina d'água acima de dois mil metros e com uma profundidade vertical real de 6000 metros. Nesta prospecção era esperada a perfuração através de quase 2000 metros de rocha de sal (halita, carnalita e taquidrita). Vale ressaltar que até 2005 somente a halita e anidrita estavam presentes nas prospecções sub sal. Atualmente o novo desafio é a perfuração através de espessas camadas de evaporito com diferentes sais, tais como a carnalita ($KCl.MgCl_2.6H_2O$) e taquidrita ($CaCl_2.MgCl_2.12H_2O$), que possuem taxas elevadas de fluência quando comparadas com as da halita (NaCl) (BOTELHO, 2008).

O petróleo encontrado nesta região, na qual se encontrou grandes volumes de óleo leve, é de qualidade superior àquele comumente extraído da camada pós-sal. Na Bacia de Santos, por exemplo, o óleo já identificado no pré-sal tem uma densidade de 30° API, baixa acidez e baixo teor de enxofre. São características de um petróleo de alta qualidade e maior valor de mercado. A figura 12 mostra a rocha reservatório do óleo.

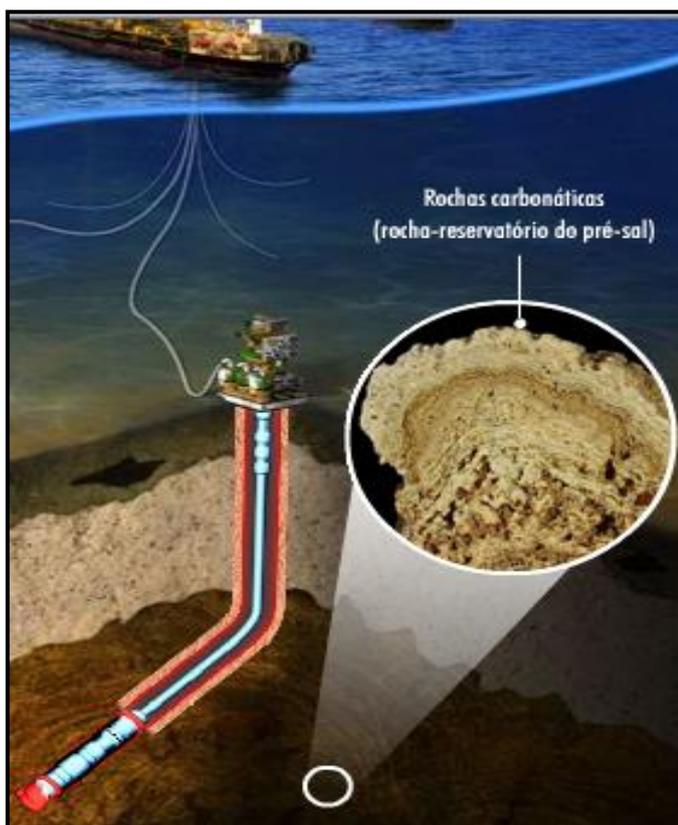


Figura 12 - Rocha reservatório do pré-sal (PETROBRAS, 2012).

2.6 Cenário Atual do Petróleo no Brasil

Apesar do entusiasmo atual em torno do pré-sal, a discussão sobre sua potencialidade não é nova. Desde meados dos anos de 1970, os geólogos da Petrobras apostavam na existência de um grande potencial de petróleo nesta região, mas não dispunham de tecnologia adequada para sua prospecção.

No final da década, em 1979, a empresa conseguiu perfurar poços que alcançaram o pré-sal na bacia de Campos, mas as descobertas confirmadas não foram significativas.

As expectativas de se encontrar uma considerável quantidade de petróleo após a camada de sal ressurgiram com mais força em 2005, com o anúncio da descoberta do mega campo de Tupi, uma reserva estimada pela Petrobras de 5 a 8 bilhões de barris de petróleo.

Projeções da Agência Internacional de Energia (AIE ou International Energy Agency IEA), para 2030, revelam um aumento no consumo diário de petróleo de 34 milhões de barris, passando dos atuais 86 milhões de barris de petróleo por dia (Mbdpd) para 120 Mbdpd (IEA, 2010). O Brasil, com uma produção estimada em 1,9 Mbdpd para o final do ano de 2012, e com suas novas reservas recém descobertas, destacando as reservas do pré-sal, tem grande importância neste contexto. Projeções para a produção de petróleo no Brasil revelam que o país poderá produzir 2,5 Mbdpd em 2016 e um total de 4,2 Mbdpd em meados de 2020, caso as projeções se confirmem (PETROBRAS, 2012). Este crescimento da produção no Brasil representa, aproximadamente, 11% do aumento da demanda mundial de petróleo neste período.

Dentre as reservas responsáveis por este crescente aumento da produção nacional, ganham destaque as reservas do pré-sal brasileiro. Graças ao seu potencial, as reservas brasileiras têm marcado um momento importante para a indústria do petróleo no Brasil e sua relação com o mundo. Com as primeiras informações publicadas em referência à região do pré-sal, muitas empresas voltaram sua atenção para o setor energético brasileiro, contribuindo para um aumento significativo das atividades desta indústria no país.

2.7 Componentes e formação do pré-sal

O estudo realizado por Andrade (1980) explica a formação dos evaporitos marinhos e apresenta os componentes que estão em solução na água do mar e de que maneira tais elementos foram precipitados pela evaporação até a formação das rochas salinas.

Os principais constituintes da água do mar estão descritos na Tabela 1. O NaCl é o constituinte da água do mar que corresponde a 78% em relação ao total de sólidos dissolvidos. Em outras palavras, o cloreto de sódio é o constituinte mais abundante desses precipitados, seguindo-se os sais de magnésio, sulfato de cálcio e cloreto de potássio. Com a evaporação, a salmoura se concentra progressivamente e ocorre a

saturação primeiramente dos compostos pouco solúveis e, posteriormente, dos sais altamente solúveis. Sendo assim, vale ressaltar que os compostos mais abundantes não necessariamente serão os primeiros a precipitar.

Tabela 1- Principais constituintes da água do mar (ANDRADE, 1980).

Constituinte	Porcentagem em relação ao total de sólidos dissolvidos
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

O primeiro composto a precipitar pela evaporação de água do mar é o CaCO₃, de solubilidade extremamente baixa, cuja quantidade em solução é pequena em relação ao NaCl. Na fase seguinte, ocorre a precipitação do CaSO₄. Antes do final da separação do CaSO₄, inicia-se a precipitação do terceiro composto, o NaCl. A partir daí, segue-se a separação de outra fase, que contém magnésio ou potássio, constituindo um sal complexo denominado polihalita (K₂SO₄.MgSO₄.2CaSO₄.2H₂O). A sequencia de minerais formados após a separação do NaCl é complexa e variável, dependendo de fatores como a temperatura e do eventual contato com cristais anteriormente formados, com os quais poderão reagir. Dois precipitados, encontrados na maioria dessas seqüências finais, são a silvita (KCl) e carnalita (KCl.MgCl₂.6H₂O).

O caso mais comum de formação de evaporitos ocorre com a precipitação de sais em bacias parcialmente isoladas, com evaporação constante, mas também com fornecimento adicional e contínuo da água salgada. Um exemplo disto é a evaporação de um mar profundo como o Mediterrâneo, cuja profundidade média é de 1.500 metros, o que produziria camadas de espessura de apenas 26 metros de halita (NaCl) e de 1,5 metros de anidrita (CaSO₄). Geologicamente, no entanto, são conhecidas camadas de CaSO₄ e NaCl com algumas centenas de metros de espessura, o que indica a influência de algum outro mecanismo, além da evaporação, numa bacia isolada.

Essas bacias parcialmente isoladas ocorrem em diversas condições geológicas, denominadas bacias de barreira. Nesta situação, a água flui para o interior da bacia por cima de uma barreira submersa, em que a evaporação superficial contínua provoca o enriquecimento das salmouras. Enquanto a recirculação da água é impedida pela barreira, as salmouras vão se depositando no fundo por serem mais densas. Pode ser que não ocorra a separação dos outros compostos por não atingir a salinidade suficiente requeridas, já que os primeiros compostos a se precipitar podem preencher totalmente a bacia (BOTELHO, 2008).

2.8 Os desafios do pré-sal

Grandes desafios relacionados a custos e a questões técnicas têm sido encontrados pelas empresas perfuradoras no caminho para o desenvolvimento da gigante jazida de petróleo e gás de Tupi. A Petrobras é a grande pioneira na exploração na região do pré-sal, porém ainda se necessita de uma intensa pesquisa para que os problemas relacionados às questões técnicas sejam solucionados. Os custos da exploração nesta região chegam a atingir o triplo da exploração realizada em campos normais e acima do sal.

Nessa profundidade, o sal se torna como uma massa plástica que se move tentando fechar o poço. A rocha é dura e estável, enquanto a camada de sal não é tão dura e menos estável. Pelo fato do sal possuir a propriedade de fluência, no qual tende a escoar como se fosse um líquido, há a necessidade de se colocar o revestimento de aço o quanto antes durante a perfuração pra evitar que o sal flua e feche o poço.

Além da rapidez e eficiência, este tipo de operação exige tubos de aço de alta resistência e preenchimento com cimento especial a fim de suportar a corrosão, força e pressão de colapso que o sal exerce sobre os tubos, que poderia ocasionar o aprisionamento e até mesmo a perda do poço. A figura 13 mostra o esquema do poço revestido de aço e cimento especial.

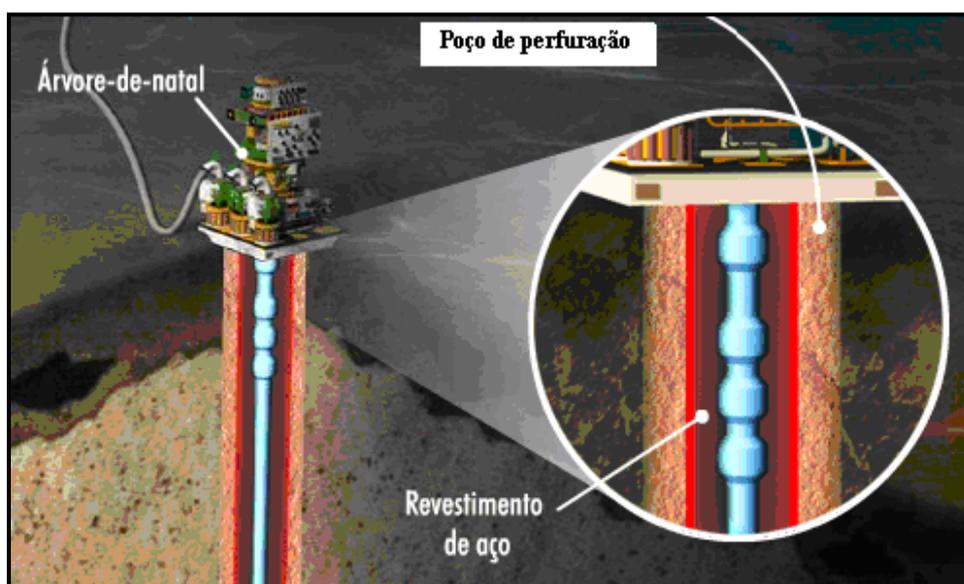


Figura 13 - Revestimento de aço e cimento especial.

A Geologia Estrutural do pré-sal é complexa, pois possui zonas de alto cisalhamento e regiões muito fraturadas e alteradas nas proximidades desta região. Além disso, a fluência associada ao sal é outro fator que pode agravar os problemas de perfuração neste tipo de rocha.

Os engenheiros têm que abordar fatores que causam instabilidade no decorrer da perfuração do poço e problemas como: paredes do poço enfraquecidas por lamas

incompatíveis, restrições e furo de diâmetro abaixo do nominal causado pela fluência do sal ou alargamento devido a dissolução do mesmo.

Em muitos casos, os principais problemas existentes estão relacionados com o dinamismo da estrutura salina, cujo comportamento plástico, pode acarretar no fechamento do poço perfurado, na erosão ou dissolução da parede do poço à medida que a lama de perfuração é circulada ou mesmo no colapso dos dutos tanto de perfuração como de revestimento. O fechamento do poço pode prender as colunas de perfuração, colapsando-as, ou distorcer os dutos de revestimento, uma vez que com o passar dos anos, a formação salina tende a se movimentar, mesmo que lentamente (FARMER *et al.*, 1996) (Figura 14).

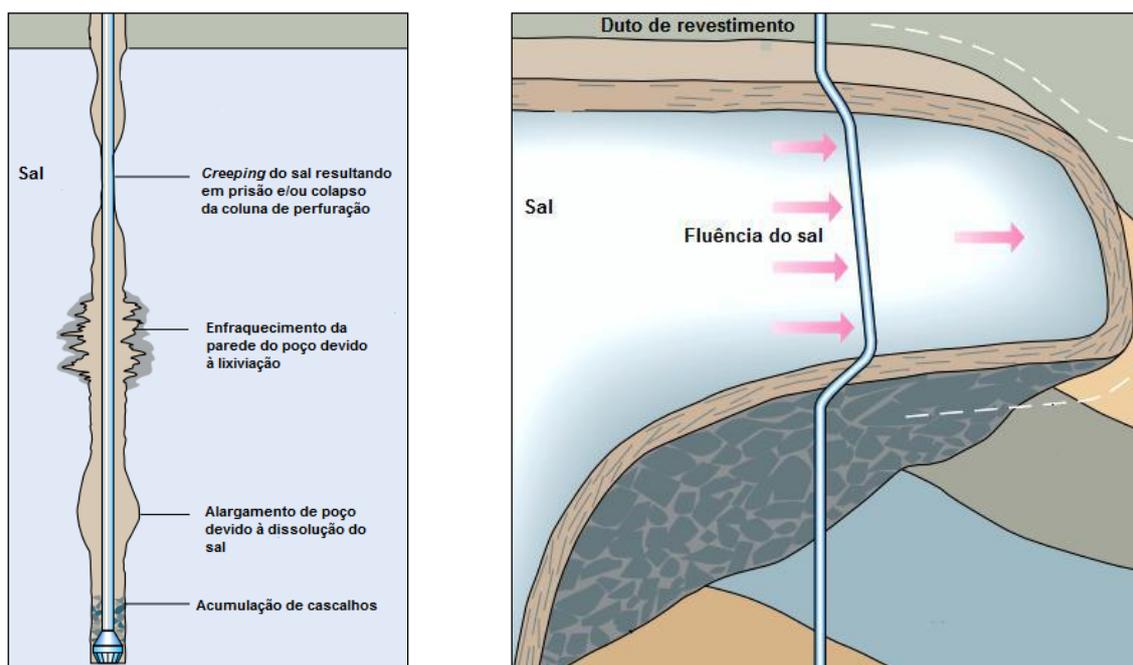


Figura 14 - Desafios na perfuração de poços em seções de sal (FARMER *et al.*, 1996).

Oliveira *et al.* (1985) realizaram um grande estudo acerca dos problemas de perfuração relacionados a evaporitos na Bacia de Campos. Neste estudo mostra que, quando a camada de sal começa a obstruir o poço, devido à fluência do sal, há um aumento do torque durante a perfuração e dificuldades no manuseio da coluna de perfuração durante as manobras, fenômeno conhecido como ameaça de prisão da coluna de perfuração.

Medeiros (1999) diz que a prisão da coluna, assim como outros problemas relacionados a exploração dessa região salina, ocorrem no início da perfuração da camada de sal quando os parâmetros de perfuração e propriedades do fluido de perfuração ainda não foram devidamente ajustados às novas condições. Para solucionar estes problemas de fechamento da coluna de perfuração do poço em pontos acima da broca, repassa-se o trecho em questão fazendo-o voltar às suas dimensões originais, ou seja, ao diâmetro nominal da broca.

No trabalho apresentado por Oliveira *et al.* (1985) foram realizadas perfurações de 26 poços exploratórios em evaporitos na Bacia de Campos. Desses 26 poços, 11 obtiveram aprisionamento da coluna, mas que foram resgatados após muito esforço e utilização de lubrificantes, 3 poços tiveram de ser desviados por conta do efeito de fluência que ocasionou o aprisionamento dos poços, 1 poço colapsou devido à grande pressão ocasionada pelo sal e 3 poços foram perdidos.

Apesar das grandes dificuldades de perfuração observa-se que o número de perda de poços é pequeno, o que torna viável a exploração e produção de óleo e gás na camada pré-sal. Entretanto, o projeto de Tupi exige alta tecnologia, é muito complicado, caro e foram necessários 2 anos apenas para estudar como perfurar o poço exploratório.

Para atingir as camadas pré-sal, entre 5000 e 7000 metros de profundidade, a Petrobras desenvolveu novos projetos de perfuração: mais de 2000 metros de sal foram atravessados. O primeiro poço demorou mais de um ano e custou US\$ 240 milhões, já um poço na bacia de Campos é perfurado em 60 dias com custo estimado em US\$ 15 milhões.

Após alguns anos de exploração da camada pré-sal e o investimento em tecnologia, já é possível perfurar um poço na mesma região em apenas 60 dias com custo de US\$ 60 milhões.

Um fator importante que deve ser levado em consideração é o tempo de perfuração de um poço. Em média, o aluguel de uma sonda custa US\$ 700.000,00 por dia, sendo assim, é muito importante minimizar o tempo perdido durante essas operações.

Também há o problema durante a cimentação, pois o sal influencia no tempo de secagem e na reologia da pasta.

Outra dificuldade encontrada nesta região do sal é com relação aos fluidos de perfuração, que devem ser estudados mais a fundo. Os fluidos a base de água têm a vantagem de serem mais baratos, são ecologicamente corretos e possuem boa estabilidade reológica, no entanto, nesta região, estes fluidos sofrem dissolução de sal. Para contornar este problema, foram desenvolvidos fluidos saturados em cloreto de sódio, mas como o reservatório de óleo encontra-se a altas temperaturas e a solubilidade aumenta com a temperatura, nestas condições, ocorrerá a dissolução de sal. Além disso, como nesta região existem mais 6 tipos de sais ocorrerá a dissolução de outros sais no fluido de perfuração.

O processo de dissolução do sal nos fluidos de perfuração modifica as propriedades físico-químicas e reológicas destes fluidos, o que interfere em todo sistema de controle de perfuração, já que quando se modificam os parâmetros reológicos do fluido não se pode utilizar as mesmas correlações que prevêm as perdas de carga ocasionadas pelo fluido. Sendo assim, o conhecimento da dinâmica de dissolução do sal é de grande importância para a avaliação das propriedades do fluido durante este procedimento.

2.9 A Velocidade de Dissolução Salina

Na difusão de eletrólitos em soluções líquidas diluídas, os eletrólitos constituem-se de solução composta de solvente, normalmente água, na qual uma determinada substância decompõe-se em íons, como por exemplo, a dissolução de sais. Quando se dissolve o sal de cozinha (NaCl) em água, não ocorre a difusão da molécula de sal; há na realidade, a sua dissociação nos íons Na^+ (cátion) e Cl^- (ânion), os quais se difundirão como se fossem moléculas independentes. Devido ao tamanho dos íons, é de se esperar que as velocidades de cada um venham a ser maiores do que as de uma molécula do sal. Todavia, em se tratando de eletrólitos, a velocidade do íon está associada tanto com o potencial químico quanto com o eletrostático, segundo (CREMASCO, 2002):

$$(\text{Velocidade}) = (\text{Mobilidade}) \cdot \left[\left(\frac{\text{Diferença de}}{\text{Potencial Químico}} \right) + \left(\frac{\text{Diferença de}}{\text{Potencial Eletrostático}} \right) \right]$$

A velocidade é influenciada tanto pela diferença de concentração iônica quanto pela diferença de potencial eletrostático. Esse movimento, por sua vez, é decorrente das colisões das moléculas do solvente com os íons (CREMASCO, 2002).

Uma quantidade de sal, ao dissociar-se totalmente, irá gerar quantidades de íons proporcionais ao módulo da sua valência: princípio da eletroneutralidade. O movimento relativo entre os íons e a solução é igual. No caso de eletrólitos (1-1) (valência iguais a 1 tanto para o cátion quanto para o ânion), nota-se que as concentrações dos íons são iguais. Isso é de fácil verificação, pois uma certa quantidade do sal (1-1) apresenta o mesmo número de cátions e ânions.

Além disso, admite-se que as velocidades dos íons são iguais, independente da diferença de tamanho entre eles. Supondo um deles maior, ele se moverá mais lentamente do que o outro. Todavia, devido à carga iônica, o íon mais rápido será desacelerado até a velocidade do íon correspondente (BIRD *et al.*, 2002).

2.10 Transferência de Massa

Quando um sistema contém dois ou mais componentes cujas concentrações variam de ponto a ponto, há uma tendência natural de a massa ser transferida, minimizando a diferença de concentração dentro do sistema e chegando-se ao equilíbrio. O fluxo de matéria (ou de massa, ou de mols) de uma região de maior concentração para outra de menor concentração de uma determinada espécie química é chamado transferência de massa (BENÍTEZ, 2009).

A espécie que é transferida denomina-se soluto. As regiões que contém o soluto podem abrigar população de uma ou mais espécies químicas distintas do soluto, as quais são denominadas solvente. O conjunto soluto-solvente, por sua vez, é conhecido como mistura (para gases) e solução (para líquidos). Tanto uma quanto outra constituem o meio onde ocorrerá o fenômeno de transferência de massa (BIRD *et al.*, 2002).

O movimento de uma espécie química de uma região de maior concentração para uma região de menor concentração pode ser observado a olho nu, soltando-se um pequeno cristal de permanganato de potássio (KMnO₄) em um becker com água. O permanganato de potássio começa a dissolver-se dentro da água, e muito perto do cristal há uma solução concentrada, roxo escuro, do sal. Devido ao gradiente de concentração que é estabelecido, o permanganato se difunde afastando-se do cristal. O processo de difusão pode ser seguido observando-se o crescimento da região roxa. Roxo escuro onde a concentração de permanganato é alta e roxo claro onde é baixa (BIRD *et al.*, 2002).

A diferença de concentração do soluto traduz-se em força motriz, necessária ao movimento da espécie considerada de uma região a outra. O teor da resposta de reação desse movimento, em virtude da ação da força motriz, está associado à resistência oferecida pelo meio ao transporte do soluto (BIRD *et al.*, 2002)

2.10.1 Difusão Versus Convecção Mássica

A difusão é um fenômeno de migração de espécies de uma região de maior concentração para uma região de menor concentração sob a força motriz de um gradiente de concentração. O transporte dá-se em nível molecular, no qual há movimento aleatório das moléculas, cujo fluxo líquido obedece a segunda lei da termodinâmica. A resistência ao transporte está associada à interação soluto-meio (SHARMA, 2007).

Na convecção mássica, a transferência de massa ocorre em nível macroscópico, cuja força motriz é a diferença de concentração e a resistência ao transporte está associada à interação soluto-meio mais ação externa. Essa ação externa relaciona-se com as características dinâmicas do meio e a geometria do lugar onde ele se encontra (CREMASCO, 2002).

A difusão trata da transferência de matéria regida principalmente por fenômenos que ocorrem em nível molecular. Contudo, a transferência de massa não ocorre somente nesse nível; quantidades de matéria podem ser transportadas por perturbações na mistura em que estão contidos. Tais perturbações ocasionam movimentação do meio de transporte e o soluto será transferido tanto devido ao seu gradiente de concentração quanto em virtude do movimento do meio (BIRD *et al.*, 2002).

A contribuição convectiva avalia o efeito da velocidade do meio na distribuição da concentração do soluto. Se essa velocidade vier a ser causada por agentes mecânicos externos ao que acontece no interior da região de transporte, como por exemplo, um compressor ou uma bomba, tem-se a convecção mássica forçada. Todavia quando o movimento do meio for ocasionado pela combinação do gradiente de concentração do soluto, o qual provoca variação na densidade do meio, e de uma ação volumar, sem a ação de agentes mecânicos, tem-se a convecção mássica livre (BAEHR & STEPHAN, 2006).

Na convecção mássica forçada deve-se considerar a influência do escoamento forçado da mistura na distribuição de concentração do soluto. Saliente-se que essa distribuição depende da distribuição de velocidade da mistura (ou do solvente), a qual independe da distribuição de concentração do soluto (CREMASCO, 2002).

Neste trabalho os fenômenos difusivos envolvidos no processo não foram considerados significativos frente aos fenômenos convectivos, visto que as velocidades de transporte da mistura (sólido/líquido) eram altas. Dessa forma, o escoamento da suspensão salina promove um regime de plena turbulência que pode ser comprovado através do elevado número de Reynolds.

2.10.2 Coeficiente Convectivo de Transferência De Massa

O coeficiente convectivo de transferência de massa serve para calcular o fluxo de certo soluto em um fenômeno de transferência de massa numa dada interface. Basta conhecer as concentrações do soluto na fronteira considerada, por intermédio de uma relação de equilíbrio, e no seio da fase na qual se dá a transferência de massa (BIRD *et al.*, 2002).

O fluxo molar para a convecção mássica está descrito na equação 1,

$$N_{A,Z} = K \cdot (C_A - C_{A\infty}) \quad (1)$$

Onde $N_{A,Z}$ é o fluxo molar do soluto A na direção Z, K é o coeficiente global de transferência de massa, C_A é a concentração final e $C_{A\infty}$ é a concentração considerando diluição infinita (BENNETT & MYERS, 1978).

Na equação 3 é mostrada que a força motriz ao fluxo mássico do soluto é a sua diferença de concentração, que define empiricamente o coeficiente global de transferência de massa K , no qual é um parâmetro cinemático e depende do movimento e das características do meio, bem como da interação molecular soluto-meio (BIRD *et al.*, 2002).

O coeficiente global de transferência de massa é definido como a mobilidade do soluto no meio governada pela interação soluto-meio mais ação externa. Quanto mais agitado, melhor é a mobilidade do soluto. Essa mobilidade é dificultada pelo tamanho das moléculas, quanto maior a molécula, pior a mobilidade das mesmas. Análise semelhante é feita quanto à ação da pressão, quanto maior a pressão, pior é a mobilidade das moléculas (CREMASCO, 2002).

Conclui-se então que a resistência ao transporte é o inverso da mobilidade que o soluto tem em relação à solução, conforme equação 2,

$$K \equiv \frac{1}{R} \quad (2)$$

Onde R é a resistência à convecção mássica.

Um dos grandes problemas de transferência de massa é justamente definir este coeficiente. O trabalho para defini-lo adequadamente passa, necessariamente, pelo conhecimento do meio em que está havendo o transporte do soluto (CREMASCO, 2002).

2.10.3 Modelos Para o Coeficiente Convectivo de Transferência De Massa

As noções prévias do mecanismo de transporte de massa em interfaces foram deduzidas a partir do conceito de filme estacionário de fluido, adjacente a cada um dos lados da interface. Embora se soubesse que não há um filme estável, realmente presente na maioria dos sistemas de transporte de massa, o conceito da Teoria do Filme foi a base da maioria dos modelos de transporte de massa em regime permanente (BENNETT & MYERS, 1978).

Reconheceu-se, que esta teoria possuía aplicação útil, o filme teria que ser muito fino, de modo que a quantidade de soluto no filme fosse pequena em relação à quantidade que passa através dele, ou o gradiente de concentração teria de ser definido rapidamente (TREYBAL, 1981). Segundo Bennett e Myers (1978), esta teoria levava à definição de coeficientes de transporte em termos da difusividade e da espessura do filme.

A equação 3 caracteriza a Teoria do Filme, que é uma proposta de mecanismo de transporte de massa,

$$K \propto \frac{D_{AB}}{Y}, \quad (3)$$

Onde K é o coeficiente global de transferência de massa, D_{AB} é o coeficiente de difusão e Y é a espessura da região estagnada (CREMASCO, 2002).

2.10.4 Equação da Continuidade em Transferência de Massa

A equação da continuidade permite analisar pontualmente o fenômeno de transferência de massa por intermédio do conhecimento da distribuição de concentração de um determinado soluto no tempo e no espaço, sujeito ou não a transformações (BIRD *et al.*, 2002).

A equação da continuidade mássica de um certo soluto A é oriunda do balanço de taxa de matéria, a qual flui através das fronteiras de um elemento de volume eleito no meio contínuo e da taxa que varia no interior deste volume de controle. O balanço material para uma dada espécie química A através de um volume de controle apropriado é (BIRD *et al.*, 2002):

$$\left(\begin{array}{c} \text{Taxa de Massa} \\ \text{que Entra} \\ \text{no Volume} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Taxa de Massa} \\ \text{que Sai} \\ \text{do Volume} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Taxa de Produção} \\ \text{de Massa} \\ \text{no Volume} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Taxa de Acúmulo} \\ \text{de Massa} \\ \text{no Volume} \end{array} \right)$$

No caso do estudo da dissolução de NaCl durante o escoamento em salmoura os termos utilizados, com relação ao fluido são: a taxa de massa de sal que entra no volume e a taxa de acúmulo de massa de sal no volume de controle.

2.11 Cinética de Dissolução

Existem poucas informações sobre a cinética de dissolução de sal na literatura aberta, no entanto sabe-se que este estudo foi impulsionado no contexto da lixiviação de sal em cavernas de mineração. Este processo ocorre sob fluxo laminar, isto é, o fluxo e a taxa de dissolução são muito mais lentos do que em taxas de convecção forçada. Os fundamentos da lixiviação de sal no contexto da mineração foram estabelecidos por Durie e Jessen (1964), onde provou-se que a taxa de remoção de sal de uma parede de caverna está relacionada com a concentração de salmoura no corpo principal da caverna

A literatura mostra alguns trabalhos direcionados ao estudo da dissolução de sais em diferentes tipos de fluxo. O coeficiente de liberação de massa de diferentes sais suspensos em um fluxo de líquido foi discutido por Aksel'Rud *et al.* (1992), onde o sistema dissolutivo ocorre em um circuito fechado, sendo a concentração uma função do tempo.

$$-\frac{dm_{sal}}{dt} = k \cdot A \cdot (C^* - C) , \quad (4)$$

onde m_{sal} é a massa que deixa o cristalino (fase sólida), t é o tempo, k é o coeficiente de liberação de massa, A é a área total de transferência de massa, C^* é a concentração do ponto de saturação e C é a concentração instantânea da solução de acordo com o tempo. O aparato experimental utilizado pelos autores para determinação do coeficiente de liberação de massa está ilustrado na figura 15.

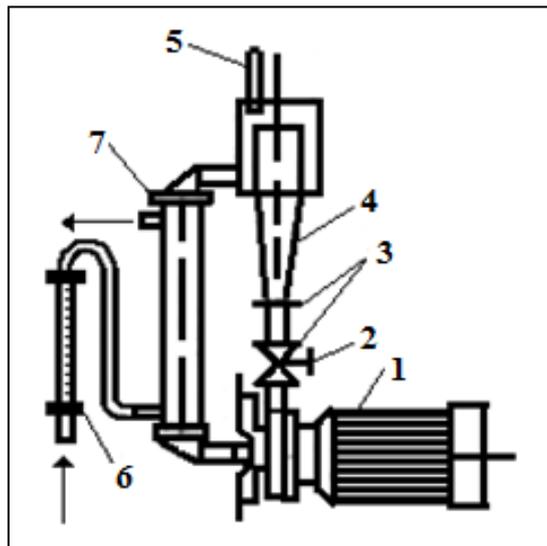


Figura 15 - Aparato experimental para determinação do coeficiente de liberação de massa de partículas suspensas em um fluxo líquido (AKSEL'RUD *et al.*, 1992).

Segundo Aksel'Rud *et al.* (1992) o aparato experimental inclui uma bomba centrífuga elétrica, número (1), que fornece solvente (água destilada) para o reator representado pelo número (4). A vazão de solvente é regulada pela válvula (2), a fim de garantir a circulação das partículas de dissolução. O solvente é resfriado por um trocador de calor coaxial (7), com uma vazão de fluido refrigerante aferida por um rotâmetro (6). A temperatura de circulação é medida pelo termômetro (5). Na parte inferior do reator foram instaladas telas de bronze, indicadas pelo número (3).

Os experimentos foram realizados com diferentes sais e os valores obtidos para o coeficiente de transferência de massa para cada sal encontra-se na tabela 2.

Tabela 2 - Coeficiente de liberação de massa (k), (AKSEL`RUD *et al.*, 1992).

Sal	K.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 CrO ₇	0,793
KCl	1,338
(NH ₄) ₂ SO ₄	0,652
NH ₄ NO ₃	1,169
NH ₄ Cl	1,052

As amostras utilizadas para estes experimentos foram partículas cilíndricas com altura aproximadamente igual ao diâmetro $d_e = 9$ mm formadas por prensagem de sais finamente moídos na pressão de $P=10^8$ Pa.

Os valores para os coeficientes de transferência de massa obtidos listados na tabela 2 são referentes ao aparato experimental utilizado e água destilada utilizada como solvente, além disso, várias considerações foram feitas para que fosse possível a determinação deste coeficiente.

Morse e Arvidson (2002) estudaram a dissolução de minerais de carbonato da superfície da terra, considerando o mesmo conceito em torno do coeficiente de transferência de massa. Seu modelo consistia na equação 5.

$$-\frac{dm_{calcita}}{dt} = \frac{A}{V} \cdot k \cdot (1 - \Omega)^n , \quad (5)$$

onde $m_{calcita}$ é o número de moles de calcita, t é tempo, A é a área total do sólido, V é o volume de solução, k é o coeficiente de transferência de massa, n é uma constante positiva que expressa a ordem da reação e Ω é o estado de saturação.

Finneran e Morse (2009) apresentaram um estudo sobre a cinética de dissolução de calcita em águas salinas com base no modelo proposto.

$$R = k \cdot (1 - \Omega_{calcite})^n , \quad (6)$$

onde R é a taxa de dissolução normalizada para a área de superfície de reação, k é o coeficiente de transferência de massa, $\Omega_{calcite}$ é o estado de saturação e n é a ordem de reação.

Alkattan *et al.* (1997) estudaram a cinética de dissolução de halita considerando o modelo de massa de acordo com o coeficiente de cada íon.

$$\frac{dm_{Na^+}}{dt} = \frac{dm_{Cl^-}}{dt} = k_t \cdot (C_{sat} - C^*) , \quad (7)$$

Onde k_t é o coeficiente de transferência de massa determinado pela relação entre o coeficiente de difusão e o coeficiente de camada limite, demonstrado pela equação 8.

$$k_t = \frac{D}{\delta} , \quad (8)$$

Magalhães *et al.* (2011), realizaram um estudo da cinética de dissolução de NaCl em um tanque de mistura. Este estudo foi baseado no desenvolvimento de uma correlação matemática que determina o coeficiente convectivo de transferência de massa frente à mudança de temperatura e do grau de agitação (Re).

O modelo matemático foi baseado no ganho de sal na solução, conforme mostra a equação 9.

$$\frac{dC}{dt} = \frac{k \cdot A_p \cdot (C^* - C)}{V} , \quad (9)$$

Onde C é a concentração de sal no fluido, C^* é a concentração de saturação do NaCl, k é o coeficiente convectivo de transferência de massa, A_p é a área superficial total de troca mássica para uma população de sólidos e V é o volume ocupado pelo fluido.

A área da população de sólidos é uma função direta do incremento na concentração da solução, conforme é dada pela equação 10.

$$A_p = \frac{\pi \cdot Np}{\phi} \left\{ \frac{6 \cdot [m_p - V \cdot (C - C_{inicial})]}{\rho_p \cdot \pi \cdot Np} \right\}^{2/3} , \quad (10)$$

onde A_p é a área superficial da população, ϕ é o fator de forma esfericidade, m_p é a massa total da população, $C_{inicial}$ é a concentração inicial do fluido, V o volume total da solução, ρ_p é a massa específica do sólido e Np é o número de partículas da população.

O número de partículas é obtido pela razão entre o volume total da amostra e o volume de uma partícula, considerando-a esférica. Fazendo o equacionamento matemático, tem-se a equação 11.

$$Np = \frac{6 \cdot m_p}{\rho_p \cdot \pi \cdot \overline{D_p}^3} \quad , \quad (11)$$

Com a resolução das equações 9, 10 e 11 pôde-se determinar experimentalmente o coeficiente convectivo de transferência de massa.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A estrutura da unidade construída, mostrada na figura 16, era composta por uma linha de escoamento com tubos de PVC de 150 mm de diâmetro, possuindo um total de 29 metros de extensão e um caimento de 5°. Possuía também, tubos de 2 e 3 polegadas, válvulas, 1 alimentador de sólidos, denominado Laboreto, modelo Retsch DR 100/75 e estruturas de ferro para sustentação.

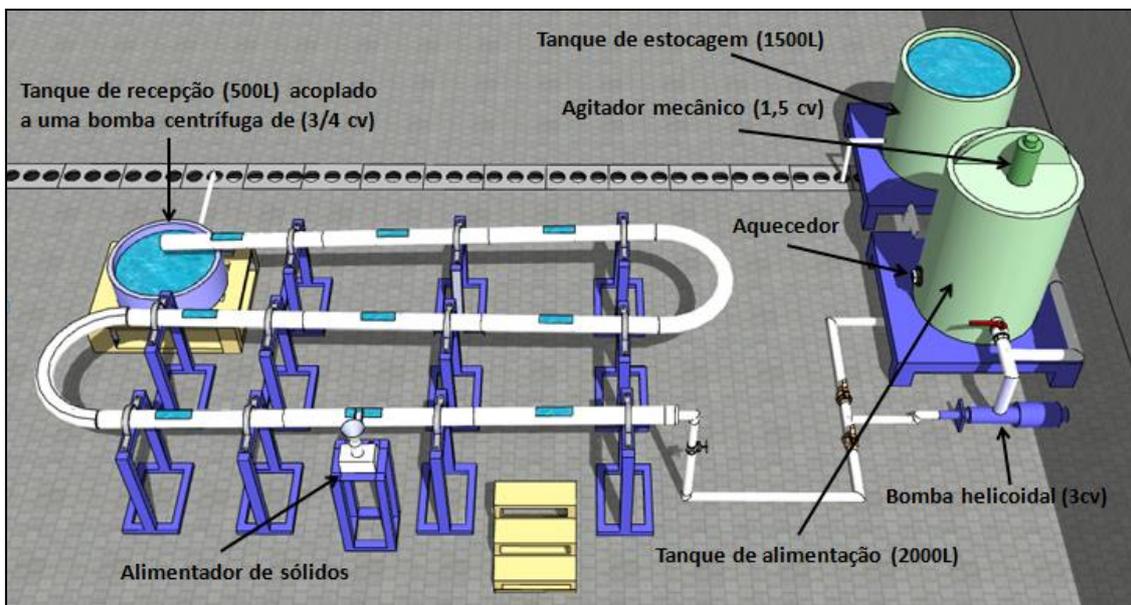


Figura 16 - Desenho esquemático da unidade experimental de escoamento de sais vista superior.

A figura 17 mostra que a unidade foi projetada com uma pequena inclinação, para garantir que não houvesse acúmulo de sal em nenhum ponto e não prejudicasse a qualidade dos resultados experimentais.

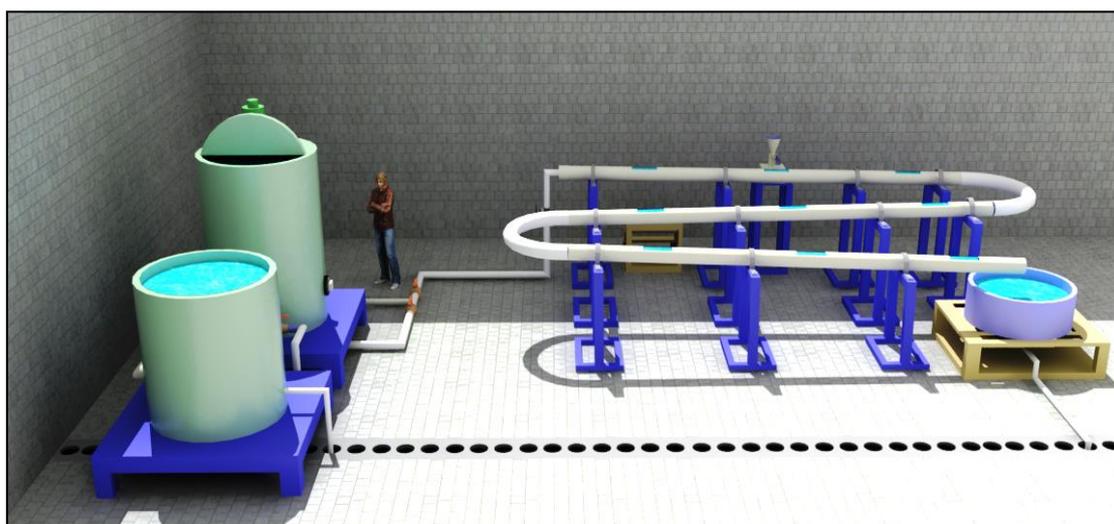


Figura 17 - Visão lateral do esquema da unidade de escoamento.

Uma bomba helicoidal de 3 cv foi conectada ao tanque de alimentação com capacidade para armazenar 2000 litros de solução. Neste mesmo tanque foi acoplado um agitador mecânico de 1,5 cv, o que permitia uma maior homogeneidade da solução.

Ao final da estrutura de tubos, a salmoura era recolhida em um tanque de recepção. A este tanque foi conectada uma bomba centrífuga de $\frac{3}{4}$ cv que transferia a solução para o tanque de estocagem. A estrutura desta unidade pode ser observada a partir das figuras de 18 a 20.

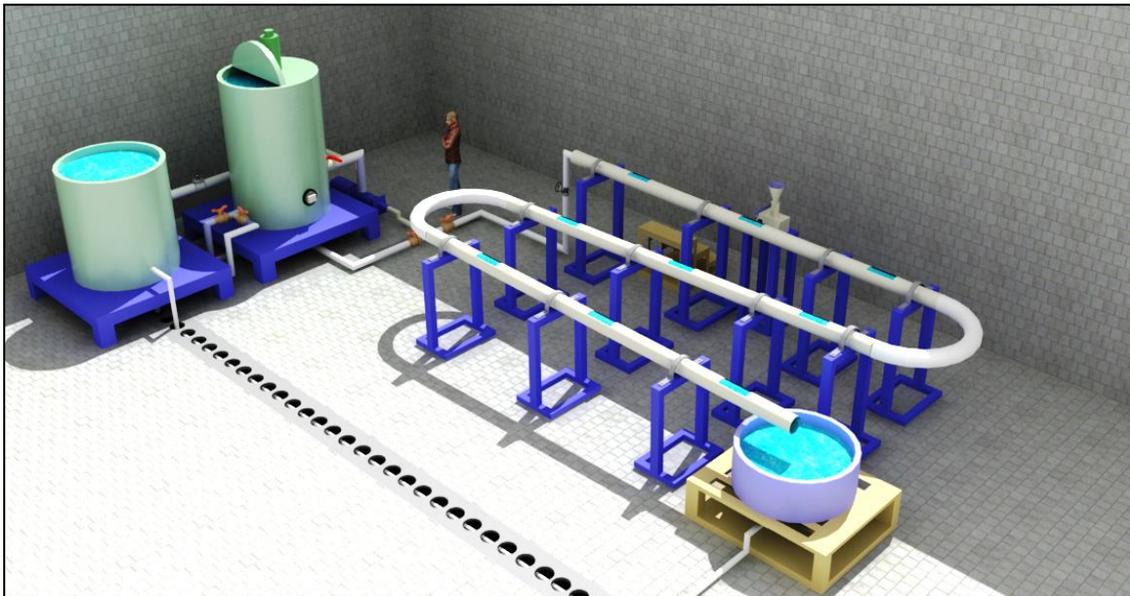


Figura 18 - Esquema da unidade de escoamento.



Figura 19 - Foto da unidade experimental de escoamento de sais vista lateral parcial.



Figura 20 - Foto da unidade experimental de escoamento de sais vista superior.

3.1 Homogeneização e Estocagem do Sal

Antes de dar início aos experimentos, primeiramente foi utilizada a técnica de quarteamento para homogeneizar as amostras e deixá-las com distribuições granulométricas próximas umas das outras, cujo principal objetivo foi a retirada de uma variável da malha (diâmetro médio das partículas) para diminuir o número de experimentos. Foi utilizado o total de 60 Kg de sal que ao aplicar esta técnica foram separadas amostras de 3,0 kg cada, nas quais foram embaladas e estocadas em isopor para evitar a umidade. A técnica é demonstrada pelas figuras 21, 22 e 23.



Figura 21- Foto da massa total de sal.



Figura 22- Foto da aplicação da técnica de quarteamento.



Figura 23- Foto da estocagem das amostras.

Para a verificação da técnica de quarteamento foram realizadas análises granulométricas nas 12 amostras utilizadas nos experimentos, em princípio uma boa homogeneização é proporcional à similaridade dos diâmetros médios de Sauter de cada amostra. As peneiras utilizadas para esta análise foram distribuídas nos meshes 4, 6, 8, 10, 14, 20 e fundo.

Toda massa retida no mesh 4 foi descartada. Apesar de ter sido promovida a homogeneização das amostras, optou-se por esse procedimento para minimizar qualquer erro advindo de possíveis diferenças no diâmetro médio de Sauter de uma amostra para a outra. As figuras 24 e 25 representam o agitador de peneiras e a análise granulométrica da amostra respectivamente.



Figura 24-Agitador de peneiras.



Figura 25-Análise granulométrica da amostra.

3.2 Medidas de Concentração

A determinação das concentrações que foram medidas nos experimentos foi feita através de um condutivímetro com compensador automático de temperatura, modelo WTW inoLab Level 3, como mostra a figura 26.



Figura 26- Foto do condutivímetro utilizado na determinação da concentração.

A determinação da concentração das amostras se deu através de uma prévia calibração da condutividade. Isso foi feito através da adição de massa de sal previamente conhecida em um determinado volume de água, dessa forma, através de um ajuste, obteve-se uma relação entre condutividade e concentração.

3.3 Procedimento Experimental

O procedimento para a realização dos experimentos de dissolução de NaCl durante o escoamento em salmoura foi realizado da seguinte maneira: Após a análise granulométrica, a amostra era adicionada ao Laboreto modelo Retsch DR 100/75 (figura 27) que fornecia uma alimentação contínua de sólidos à estrutura de tubos. Este aparelho possuía um medidor manual de frequência para regulação do número de vibrações, o que permitia controlar a vazão na qual se pretendia obter, mantendo-a constante.

Para maior precisão da vazão de sólidos, foram feitas aferições em triplicata por técnica gravimétrica. A alimentação de sólidos foi feita em janelas operacionais (aberturas feitas nos tubos), permitindo a adição de sal em diferentes pontos da unidade.



Figura 27- Laboreto posicionado em uma das janelas operacionais.



Figura 28 - Foto do laboreto.

A alimentação da solução salina, contida no tanque de alimentação, foi feita por uma bomba helicoidal de 3 cv, que diferentemente do laboreto, despejava o fluxo líquido sempre no início dos tubos. A solução salina escoava pela linha com vazão constante e era coletada no tanque de recepção. A vazão foi controlada pela

manipulação das válvulas existentes no recalque e aferida no final dos tubos através de técnica gravimétrica em triplicata.

No início do experimento era importante que os fluxos de líquido e de sólidos se encontrassem ao mesmo tempo, para que não houvesse acúmulo de sal nos tubos, o que alteraria os valores de dissolução do sal.

O sólido escoava juntamente com a solução através dos tubos e, em um mesmo instante de tempo, 4 amostras da solução eram coletadas através de tomadas de concentração (figuras 29 e 30), dispostas ao longo da unidade nas distâncias de 5,5; 13,0; 20,5 e 26,7 metros. Em cada amostra coletada foi feita a determinação da concentração através do condutivímetro apresentado na Figura 26, o que permitia o levantamento do perfil de concentração ao longo do escoamento.

As tomadas de concentração possuíam na sua extremidade externa, uma seringa com capacidade de recolhimento de 60 mL e na extremidade interna, possuía um tecido envolto por uma tela de aço com mesh 100, capaz de impedir a sucção de partículas menores para dentro das amostras coletadas.



Figura 29- Foto do posicionamento das tomadas de concentração.



Figura 30- Foto da extremidade interna da tomada de concentração.

No final da unidade de escoamento foi posicionada uma tela de mesh 100 (figura 31) fazendo com que os sólidos ficassem retidos e a solução salina fosse recolhida no tanque de recepção. A medida em que o sal era coletado, foi necessário que esta massa fosse deslocada com o auxílio de um pincel, para uma região da tela na qual não estivesse em contato com a solução que descia dos tubos, a fim de evitar que o resultado da dissolução fosse prejudicado.



Figura 31- Tela de recolhimento de sal mesh 100.

A grandeza FD (Fator de Dissolução) foi adotada para indicar o quanto de sal foi dissolvido no processo em questão, o qual pode ser obtido a partir de um balanço de massa global, já que se sabe o quanto foi alimentado, bem como a massa restante não dissolvida. O FD é obtido através da divisão da massa total dissolvida pela massa total alimentada.

3.4 A secagem do sal

Após o recolhimento da massa de sal que não foi dissolvido durante o escoamento foi necessário fazer a secagem do material com a finalidade de retirar a umidade presente na amostra, para que os resultados da dissolução não fossem alterados.

A secagem do sal foi feita por um processo convectivo, o qual foi idealizado a partir da pesquisa do processo usado na indústria do sal, visto que a secagem em estufa promove a aglomeração do sal, impossibilitando a determinação do diâmetro médio de Sauter caso haja necessidade futura. Para isto construiu-se uma pequena unidade de secagem, contendo basicamente um soprador de 4cv, tubos, válvulas, flanges e telas de contenção com Mesh 100 para aprisionamento do sal.

O sal úmido era levado para a unidade de secagem durante 45 minutos. Esse tempo foi arbitrado com base no testemunho ocular da formação de pó, ou seja, após 45 minutos de secagem verificava-se a formação de pó de sal, o que era um indicativo de ausência de umidade.

O processo consistia em o equipamento soprar ar para dentro do recipiente em que o sal ficava retido, no qual era limitado por telas de contenção. Através deste processo convectivo, permitia-se retirar praticamente toda umidade presente no material por meio de jorros promovido pelo fluxo do ar que impediam a formação de aglomerados. Nas figuras 32 e 33 é mostrada a unidade de secagem utilizada.

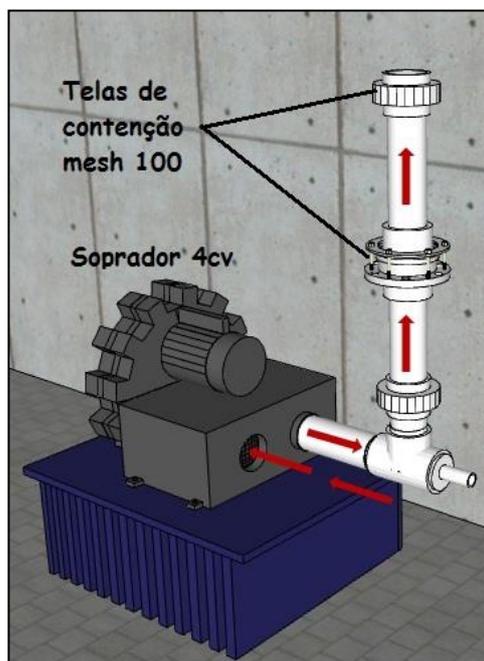


Figura 32- Esquema da unidade de secagem do sal por convecção.



Figura 33- Foto da unidade de secagem do sal por convecção.

Um estudo realizado por Magalhães (2009) mostrou que esse processo de secagem não promove a destruição de partículas, visto que a distribuição granulométrica da massa de sal não variou com o tempo de secagem. Isto possibilita, caso haja a necessidade futura, a determinação do diâmetro médio das partículas após o processo dissolutivo.

3.5 Construção da malha de experimentos

Inicialmente tem-se 2 variáveis independentes para manipulação (Q, W), onde Q é a vazão volumétrica de salmoura e W é a vazão mássica de sólidos. A concentração inicial de alimentação de salmoura, o comprimento total de escoamento dos sólidos e a temperatura inicial do fluido, foram mantidas constantes para avaliar o efeito da vazão volumétrica de salmoura e da vazão mássica de alimentação de sólidos sobre a dissolução de partículas suspensas em salmoura durante o escoamento em calha.

Para a construção da malha de experimentos, a metodologia arbitrada foi manipular as variáveis entre dois valores, um máximo e um mínimo. A concentração da solução salina utilizada para a realização dos experimentos está em porcentagem de saturação da água em cloreto de sódio, onde o ponto de saturação da água se dá a 360 g/L (PERRY, 1997). A concentração foi fixada próxima do valor de 8,34% da saturação de NaCl, para se trabalhar próximo a concentração da água do mar e o CR (comprimento de escoamento do sal nas calhas) foi fixado para 29 metros que é o comprimento total de escoamento. A temperatura utilizada durante a realização dos experimentos, em média, foi a temperatura ambiente, aproximadamente 30°C.

Na tabela 3 é apresentada a malha que foi construída através de um planejamento experimental fatorial com 2 níveis (número de condições proposta para cada variável) e 2 fatores (número de variáveis independentes), totalizando 4 experimentos. No entanto, para garantir a confiabilidade dos dados, cada ensaio foi realizado em triplicata.

Os termos W1 e W2 significam, respectivamente, vazão mássica mínima e máxima, seus valores foram arbitrados em aproximadamente 24 g/s e 48 g/s. Já os termos Q1 e Q2 significam, respectivamente, vazão volumétrica mínima e vazão volumétrica máxima e seus valores foram de aproximadamente 1,0 L/s e 2,0 L/s. O valor da vazão volumétrica mínima foi arbitrado para que fosse capaz de carrear todo sal, sem haver acúmulo nos tubos. Além desses experimentos, foi realizado um teste em triplicata fora da malha experimental para validar o modelo matemático estudado, sendo $Q = 1,5$ L/s e $W = 36$ g/s.

Tabela 3 - Malha experimental.

Experimento	Q(L/s)	W(g/s)
1	Q ₁ (min)	W ₁ (min)
2	Q ₁ (min)	W ₂ (max)
3	Q ₂ (max)	W ₁ (min)
4	Q ₂ (max)	W ₂ (max)

4 MODELAGEM E RESOLUÇÃO NÚMÉRICA

4.1 Modelagem da dissolução de NaCl no escoamento em salmoura

Neste trabalho, o modelo matemático utilizado para a dissolução de NaCl em salmoura é composto por três equações diferenciais parciais (EDP), obtidas com base na conservação de massa para a fase líquida e sólida e na conservação de energia para a mistura. Esta modelagem busca representar o sistema experimental estudado e foi descrita inicialmente por Magalhães *et al.* (2011). A equação 12 é o balanço de massa para o sal em solução e a equação 13 é o balanço de massa de sal na fase sólida.

Como a dissolução salina promove a mudança na concentração do fluido (C) ao longo do escoamento e do tempo, assim como a fração volumétrica de sólidos (ε_s) e a temperatura do fluido (T), pode-se observar a dependência dessas variáveis com a posição (z) e com o tempo (t), conforme pode ser observado nas equações seguintes.

$$\frac{\partial}{\partial t} C(z, t) + \bar{v}_z \left(\frac{\partial}{\partial z} C(z, t) \right) = k \cdot a \cdot (C^* - C(z, t)) , \quad (12)$$

$$\rho_{sal} \left(\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_s(z, t) + \bar{v}_z \left(\frac{\partial}{\partial z} \varepsilon_s(z, t) \right) \right) = -k \cdot a \cdot (C^* - C(z, t)) , \quad (13)$$

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

O coeficiente convectivo de transferência de massa (k) define a taxa com que os íons deixam os cristais e migram para a salmoura. Para este estudo, o coeficiente é um parâmetro estimado a partir do conjunto de experimentos realizados, onde o seu valor é constante, pois observou-se pouca influência do número de Reynolds. A determinação desse parâmetro será discutida no tópico 5.4.

A área específica das partículas de sal é definida como a área da superfície total para a transferência de massa por unidade de volume, que pode ser representado pela seguinte equação:

$$a = \frac{6 \cdot \varepsilon_s(z, t)}{\overline{D_{pe}}} , \quad (14)$$

Onde $\overline{D_{pe}}$ é o diâmetro médio de Sauter, definido como (MASSARANI, 2002),

$$\overline{D_{pe}} = \frac{1}{\int_0^1 \frac{dX}{D_p}} \cong \frac{1}{\sum_i \frac{\Delta X_i}{D_{pi}}} , \quad (15)$$

A equação abaixo permite a determinação da temperatura em relação a posição e ao tempo, contemplando os balanços de energia para a convecção forçada de um fluxo aberto para o ar, a condução de calor nos tubos e o calor retirado pela dissolução endotérmica.

$$\frac{\partial T(z, t)}{\partial t} + \bar{v}_z \left(\frac{\partial T(z, t)}{\partial z} \right) = - \frac{(Q_1 + Q_2 + Q_3)}{\rho_{solução} \cdot cp} , \quad (16)$$

onde Q_1 é taxa de calor perdida por convecção forçada, Q_2 é a taxa de calor perdida pela dissolução endotérmica, Q_3 é a taxa de calor perdida por condução, $\rho_{solução}$ é a massa específica da solução e cp é o calor específico da solução.

A massa específica da solução é obtida através da média ponderada das frações mássicas de solvente e de sal, como está demonstrado na equação 17.

$$\rho_{solução} = W_{solvente} \cdot \rho_{solvente} + W_{sal} \cdot \rho_{sal} , \quad (17)$$

A concentração de sal na solução é dada pela equação 18. Dividindo ambos os lados da equação 18 pela massa de solução e fazendo um rearranjo, pode-se obter a fração mássica de sal como é demonstrado na equação 19.

$$C_{sal} = \frac{m_{sal}}{V_{solução}} , \quad (18)$$

$$W_{sal} = \frac{C_{sal}}{\rho_{solução}} , \quad (19)$$

Substituindo a equação 19 na equação 17 pode-se obter a densidade da solução em função da concentração instantânea, como está demonstrado na equação 20.

$$\rho_{solução} = \frac{C(z, t) \cdot (\rho_{sal} - \rho_{solvente})}{(\rho_{solução} - \rho_{solvente})} , \quad (20)$$

onde $\rho_{solução}$ é a densidade da solução, $\rho_{solvente}$ é a densidade do solvente (salmoura de alimentação) e ρ_{sal} é a densidade do NaCl.

A taxa de calor retirada por convecção forçada, Q_1 , é definida pela equação 21 (INCROPERA, 2007).

$$Q_1 = h \cdot A_{convecção} \cdot (T(z, t) - T_{ambiente}) , \quad (21)$$

onde h é o coeficiente de transferência de calor, $A_{convecção}$ é a área de transferência de calor por convecção a ser definida, e $T_{ambiente}$ é a temperatura ambiente.

Para a taxa de calor retirada pela dissolução endotérmica (Q_2), foi proposta a equação 20 com base na dissolução de calor por mol de dissolução.

$$Q_2 = \frac{k \cdot a \cdot (C^* - C(z, t)) \cdot q_d}{MM}, \quad (22)$$

onde k é o coeficiente convectivo de transferência de massa a ser estimado, a é a área de superfície total para a transferência de massa por unidade de volume, C^* é a concentração na saturação do sal, C é a concentração da solução, q_d é o calor de dissolução por mol de sal e MM é a massa molar do NaCl.

Para o cálculo da perda de energia causada pelo contato da solução com a parede do tubo, foi utilizada a equação 23 (INCROPERA, 2007).

$$Q_3 = k_{pvc} \cdot A_{condução} \cdot \frac{(T(z, t) - T_{ambiente})}{d}, \quad (23)$$

onde k_{pvc} é a condutividade térmica do material do tubo, $A_{condução}$ é a área de condução pelo contato entre a solução e o tubo a ser definida e d a espessura do tubo.

4.2 Resolução numérica

Sistemas como o descrito no item anterior são resolvidos discretizando uma das variáveis independentes, reduzindo desta forma, o sistema de equações diferenciais parciais a um sistema de equações algébrico diferenciais (EAD's).

Nesse trabalho, o procedimento para resolução deste sistema de EDP's foi a discretização por diferenças finitas feita na variável espacial z . Este processo origina um sistema de EAD's em cada célula de discretização e a resolução desse sistema é obtida pela integração das EAD's no tempo ao longo do contorno z .

As equações 24, 25 e 26 trazem, respectivamente, as aproximações por diferenças finitas das derivadas parciais no espaço (z) em relação à concentração de sal no fluido (C), a fração volumétrica de sólidos (ε_s) e temperatura do fluido (T).

$$\frac{\partial C_i}{\partial z} = \frac{C_i - C_{i-1}}{\Delta z} \quad (24)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_{si}}{\partial z} = \frac{\varepsilon_{si} - \varepsilon_{si-1}}{\Delta z} \quad (25)$$

$$\frac{\partial T_i}{\partial z} = \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta z} \quad (26)$$

Para $z_{i-1} < z < z_i$, onde

$$C_i = C(z_i, t)$$

$$\varepsilon_{si} = \varepsilon_s(z_i, t)$$

$$T_i = T(z_i, t)$$

O processo de discretização das EDP's 12, 13 e 16 gera o sistema de equações algébrico diferenciais conforme pode ser observado nas equações 27, 28 e 29.

$$\frac{dC_i}{dt} = -\bar{v}_z \left(\frac{C_i - C_{i-1}}{\Delta Z} \right) + k \cdot a \cdot (C^* - C_i) , \quad (27)$$

$$\frac{d\varepsilon_{s_i}}{dt} = -\bar{v}_z \left(\frac{\varepsilon_{s_i} - \varepsilon_{s_{i-1}}}{\Delta Z} \right) - \frac{k \cdot a \cdot (C^* - C_i)}{\rho_s} , \quad (28)$$

$$\frac{dT_i}{dt} = -\bar{v}_z \left(\frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta Z} \right) - \frac{(Q_1 + Q_2 + Q_3)}{\rho_{solução} \cdot cp} , \quad (29)$$

As equações 30, 31 e 32 são necessárias para a resolução do sistema de equações algébrica diferenciais.

$$a = \frac{6 \cdot \varepsilon_{s_i}}{D_p} , \quad (30)$$

$$\rho_{solução} = \frac{C_i \cdot (\rho_{sal} - \rho_{solvente})}{(\rho_{solução} - \rho_{solvente})} , \quad (31)$$

Os termos Q1 (equação 21) e Q3 (equação 23) não foram considerados nesta etapa do trabalho. Considerou-se, de forma preliminar, apenas a taxa de calor retirada do fluido devido ao calor endotérmico de dissolução de sal.

$$Q_2 = \frac{k \cdot a \cdot (C^* - C_i) \cdot q_d}{MM} , \quad (32)$$

Esse sistema é válido para $i = 1, 2, \dots, N$, sujeito às condições iniciais e às condições de alimentação. O número ótimo de pontos de discretização N foi obtido através de exaustivos testes com o programa simulador, verificando-se que números superiores a 30 não influenciam significativamente nos resultados encontrados.

- Condições iniciais:

$$C(z, 0) = C_0$$

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

$$T(z, 0) = T_0$$

- Condições de alimentação:

$$C(0, t) = C_a$$

$$\varepsilon_s(0, t) = \varepsilon_{sa} = \frac{\frac{W}{\rho_s}}{Q + \left(\frac{W}{\rho_s}\right)}$$

$$T(0, t) = T_a$$

Onde W é a vazão mássica de alimentação de sólidos, Q é vazão volumétrica de alimentação de salmoura e ρ_s a densidade do sólido. As vazões mássicas e volumétricas variam de acordo com cada experimento conforme mostrado no tópico 3.

Tabela 4 – Condições iniciais e condições de alimentação para cada variável.

Variáveis	Condições iniciais e Condições de alimentação
C_0 (kg/m ³)	32
C_a (kg/m ³)	32
ε_{s0}	0
ε_{sa}	$(W/\rho_s) / [Q + (W/\rho_s)]$
T_0 (K)	303
T_a (K)	303

A resolução deste sistema necessita de um algoritmo específico onde as derivadas parciais na direção axial (z) foram discretizadas por diferenças finitas à direita e as equações foram escritas na abordagem do método implícito. O sistema algébrico diferencial foi integrado utilizando a sub-rotina de domínio público LSODE em linguagem FORTRAN.

Os dados físico-químicos para a resolução da modelo matemático avaliado estão apresentados na tabela 5.

Tabela 5 - Dados físico-químicos utilizados no modelo matemático.

Descrição	Parâmetros	Valor	Bibliografia
Coeficiente de Transferência de Calor na T= 300K	h	$0,0264 \frac{W}{m.K}$	Lide, CRC Handbook, 2009.
Calor de Dissolução de NaCl	q_d	$3880 \frac{J}{mol}$	Lide, CRC Handbook, 2009.
Massa específica da solvente	$\rho_{solvente}$	$1000 \frac{kg}{m^3}$	Perry, Green, 1980.
Massa específica do sólido	ρ_{sal}	$2165 \frac{kg}{m^3}$	Kaufmann, Dale, 1960.
Calor específico da solução	cp	$3993 \frac{J}{kg.K}$	Cox <i>et al.</i> , <i>Deep Sea</i> , 1970.
Condutividade térmica do PVC	k_{PVC}	$0,156 \frac{W}{m.K}$	Perry, Green, 1980.
Viscosidade cinemática do fluido	μ	$0.001 \frac{kg}{m.s}$	Perry, Green, 1980.
Massa molar do NaCl	MM	$58,5 \frac{kg}{kmol}$	Perry, Green, 1980.
Concentração de saturação de NaCl	C^*	$360 \frac{kg}{m^3}$	Perry, Green, 1980.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Resultado da análise granulométrica

A análise granulométrica das amostras procedentes do quarteamento foi realizada para verificar a proximidade de seus diâmetros médios de Sauter, em princípio, uma homogeneização boa é proporcional à similaridade dos diâmetros médios de cada amostra.

Na tabela 6 é mostrado o diâmetro médio de Sauter para as 12 amostras, onde o valor médio obtido foi de $1,71 \pm 0,10$, observando assim um pequeno desvio padrão de 6%.

Tabela 6 - Diâmetro médio de Sauter das amostras avaliadas.

Amostra	Diâmetro médio de Sauter (mm)
1	1,72
2	1,82
3	1,71
4	1,82
5	1,86
6	1,80
7	1,66
8	1,62
9	1,64
10	1,62
11	1,61
12	1,60
Média	1,71 ± 0,10

Na figura 34 está apresentada uma análise granulométrica típica das amostras salinas. O modelo que melhor representou a distribuição da granulometria da amostra foi o Rosen-Rambler-Bennet (RRB), demonstrado pela equação 33, com os parâmetros $n = 2,438$ e $k = 2,176$. O coeficiente de correlação obtido para o modelo linearizado foi de 0,994.

$$Y = 1 - \exp \left[- \left(\frac{d\#}{k} \right)^n \right], \quad (33)$$

onde Y é a fração mássica não retida, d# é o diâmetro médio entre as malhas da peneira, n e k são os parâmetros do modelo.

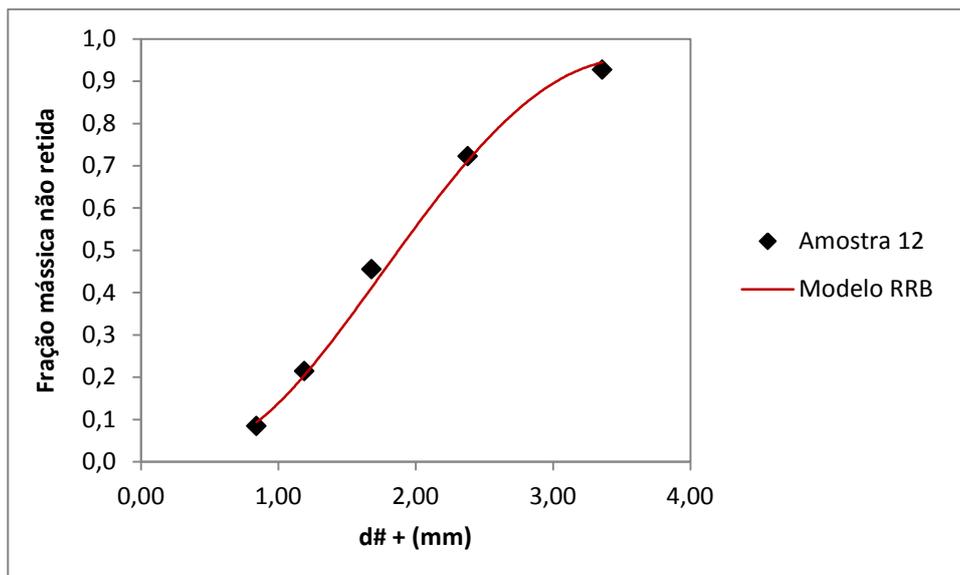


Figura 34 - Análise granulométrica típica das amostras.

Na tabela 6 e na figura 34 é mostrada que a técnica utilizada na homogeneização da massa salina se mostrou satisfatória, visto o pequeno desvio e a distribuição granulométrica das amostras.

Dessa forma, ratifica-se que todos os experimentos realizados foram feitos com o diâmetro obtido pela média das amostras, no qual o valor 1,71 mm foi usado como dado de entrada.

5.2 Determinação da concentração

Para a determinação da concentração, primeiramente foi necessário fazer a curva de calibração, que consistiu basicamente em adicionar quantidades conhecidas de sal em um volume de água previamente determinado. Sendo assim, a condutividade da solução foi medida toda vez que sólidos eram adicionados na solução, possibilitando o levantamento da curva de calibração, conforme mostra a figura 35.

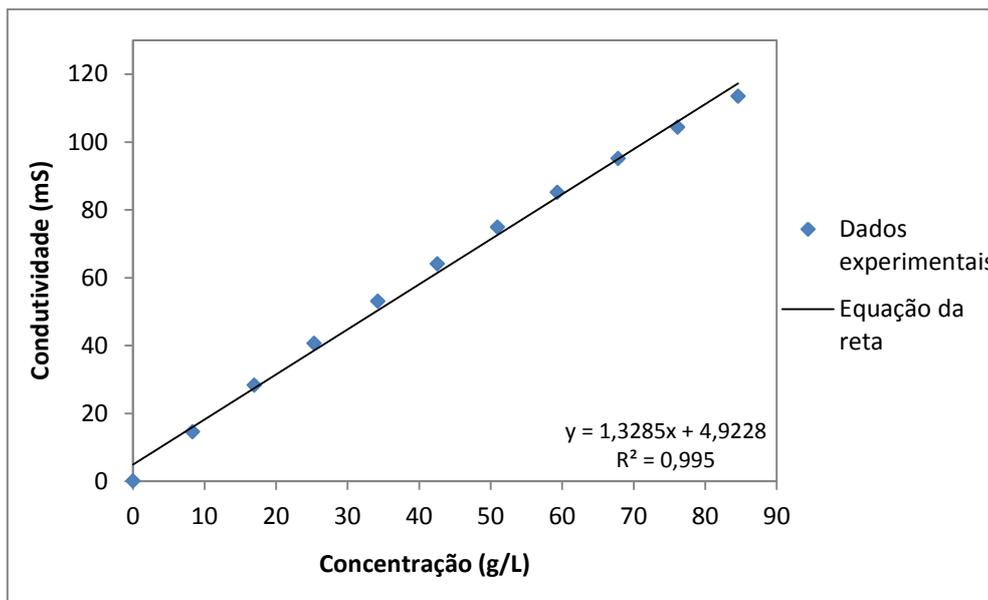


Figura 35- Curva de calibração para determinação da concentração. **RETA DEVE PASSAR PELA ORIGEM**

Através de um ajuste da equação da reta, pôde-se obter uma correlação que permitiu determinar a concentração quando conhecida a condutividade.

5.3 Resultados da umidade inicial de sal

Inicialmente teve-se a preocupação com a quantidade de água presente nas amostras de sal que foram utilizadas nos experimentos, pois sabe-se que o cloreto de sódio adsorve umidade, o que seria um problema na qualidade dos resultados obtidos. Sendo assim, foi realizado um teste em triplicata para quantificar a umidade inicial presente nas amostras de sal.

O teste foi conduzido em estufa, onde a massa de sal ficou presente durante 24 horas na temperatura de 150 graus Celsius. A tabela 7 mostra os resultados obtidos.

Tabela 7 - Teste da umidade inicial presente nas amostras salinas.

Massa inicial de sal (g)	Massa final de sal (g)	Massa perdida (%)
3000,21	2978,82	0,71
3000,32	2975,56	0,82
3000,11	2977,13	0,77

Observando a **tabela 9** percebe-se que nenhum cuidado é requerido para a mostra inicial em termos de pré secagem, a quantidade de água presente na amostra não incorre erro no balanço de massa, pois não representa nem 1% da massa total de sal.

5.4 Resultados obtidos da unidade secagem do sal via processo convectivo

O método de secagem utilizando o processo convectivo (soprador) para a retirada da umidade do sal, proveniente da dissolução durante o escoamento em salmoura, requer uma avaliação mais profunda para não comprometer os resultados do Fator de Dissolução (FD). Sendo assim, foram realizados três testes de secagem para avaliar o quanto de água consegue-se retirar utilizando o soprador.

Amostras com sal úmido advindo do processo experimental foram recolhidas e colocadas no soprador durante 45 minutos para a secagem convectiva.

Retirado o sal do soprador, amostras com massas já definidas foram levadas à estufa para secagem a 150 graus Celsius por 24 horas. A comparação dos pesos antes e depois da estufa mostrou o quanto de água ainda continha no sal depois da secagem dinâmica. A tabela 8 mostra os resultados obtidos.

Tabela 8 - Verificação da massa de água ainda presente nas amostras após secagem dinâmica.

Massa inicial de sal (g)	Massa final de sal (g)	Massa perdida (%)
120,31	119,72	0,49
107,17	106,60	0,53
104,22	103,68	0,52

Observa-se que após 24h de secagem, a média das massas perdidas em forma de água em relação ao seu peso original foi de menos de 1%, corroborando a eficácia da secagem convectiva.

5.5 Determinação da área da seção transversal ao fluxo (A_{esc})

Para a resolução do sistema de EDP's é necessário obter a área de seção transversal ao escoamento. Sendo assim, foi necessário avaliar como esta grandeza se comporta para as duas vazões volumétricas utilizadas nos experimentos executados, visto tratar-se de um escoamento em superfície livre.

Para a vazão volumétrica de 1,0 L/s, obteve-se um perímetro molhado igual a 10,3 cm, conforme está demonstrado na figura abaixo.

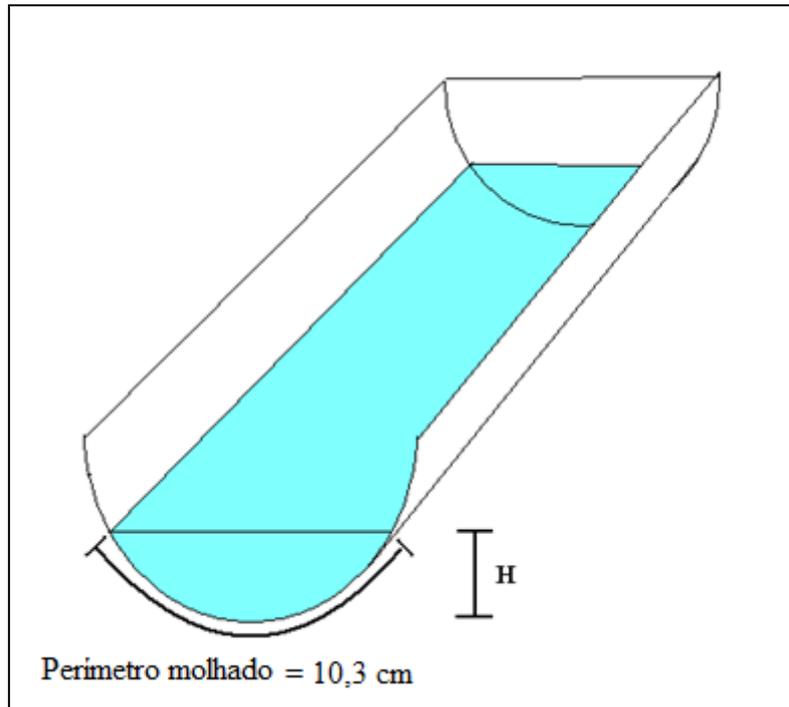


Figura 36 - Perímetro molhado para a vazão de 1,0 L/s.

Já para a vazão volumétrica de 2,0 L/s, obteve-se um perímetro molhado igual a 13,2 cm, conforme é demonstrado na figura 37.

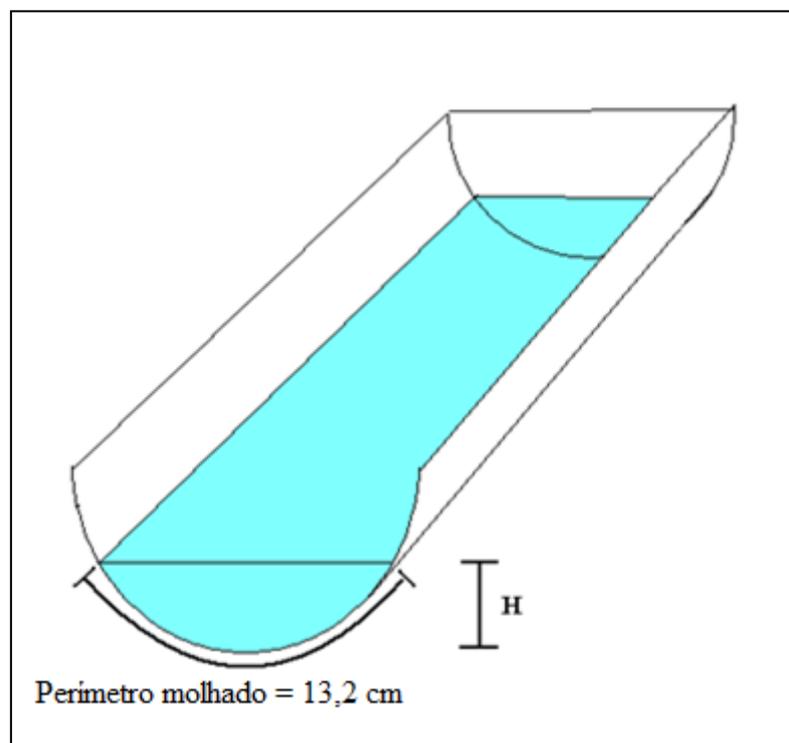


Figura 37- Perímetro molhado para a vazão de 2,0 L/s.

Considerando-se que a calha segue um modelo circular, a área transversal de escoamento pode ser obtida através da integral abaixo (LOUIS LEITHOLD, 2002):

$$A_{esc}(H) = 2 \cdot \int_0^H \sqrt{R^2 - (H - R)^2} \cdot dH \quad (34)$$

Porém a determinação experimental de H é difícil e produz muitos erros, por isto optou-se por uma sequência de cálculos para a sua determinação. Na figura 38 pode-se observar um esquema geométrico para a realização dos cálculos que serão abordados a seguir.

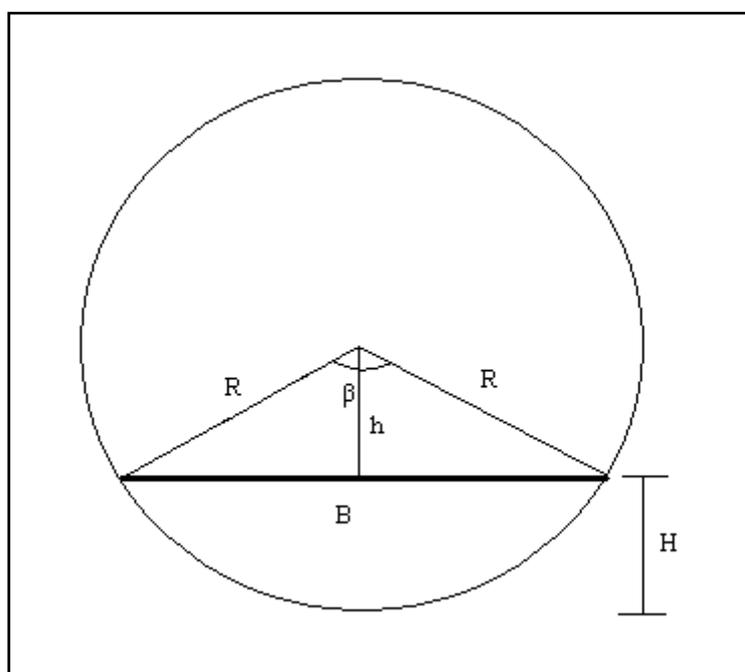


Figura 38 - Esquema geométrico para a realização dos cálculos.

Onde:

R = Raio da calha

B = Base do triângulo

H = Altura relativa ao escoamento

h = Altura do triângulo

β = Ângulo do triângulo

O valor do diâmetro da calha foi medido e obteve-se os seguintes valores:

Dcalha = 0,150m

Rcalha = 0,075m

O comprimento da circunferência pode ser obtido através da equação 35.

$$C_{circ} = 2.\pi.R \quad (35)$$

Que fornece o seguinte $C_{circ} = 0,471\text{m}$

Após o cálculo do comprimento da circunferência, determina-se o ângulo formado pelo triângulo localizado nas extremidades do perímetro molhado para a vazão volumétrica de 1,0L/s e através de uma regra de três, obtém-se $\beta = 78,73^\circ$.

Para se obter B (Base do triângulo) utiliza-se a Lei dos cossenos demonstrada pela equação 36 (LEITHOLD, 2002).

$$B^2 = R^2 + R^2 - 2.R.R.\cos \beta \quad (36)$$

Substituindo os valores em (36) obtém-se $B = 0,095\text{m}$.

Com isso, pode-se calcular h (altura do triângulo) utilizando-se o teorema de Pitágoras.

$$R^2 = h^2 + \left(\frac{B}{2}\right)^2 \quad (37)$$

Substituindo os valores em (37) tem-se $h = 0,058\text{m}$.

Através da equação (38) pode-se obter H (altura relativa ao escoamento):

$$R = h + H \quad (38)$$

Que fornece como resultado $H = 0,017\text{m}$.

Para encontrar a área transversal ao escoamento basta substituir os valores encontrados na integral descrita pela equação (34) que fornece $A_{esc} = 0,001 \text{ m}^2$.

Analogamente faz-se a sequência de cálculos para a vazão de 2,0 L/s.

Na Tabela 9 estão demonstrados os resultados obtidos da área transversal de escoamento para ambas as vazões. Pode-se observar que esta área é proporcional a vazão volumétrica.

Tabela 9 - Resultados da área transversal ao escoamento.

	Perímetro molhado (m)	H (m)	A_{esc} (m²)
Vazão (1,0 L/s)	0,103	0,017	0,001
Vazão (2,0 L/s)	0,132	0,027	0,002

5.6 Resultados do Fator de Dissolução

Foram realizados 4 experimentos em triplicata com concentração de salmoura a 32g/L (8,9% da saturação) . Os resultados da tabela 10 mostram os altos valores do fator de dissolução (FD), isto se deve à baixa concentração de salmoura que está muito distante do ponto de saturação, o que facilita a dissolução das partículas de sal.

Observando a tabela 10, pode-se perceber que o FD sofre pouca influência da vazão volumétrica (Q) mesmo quando ela é dobrada, pois a faixa operacional da vazão volumétrica para este trabalho encontra-se em regime plenamente turbulento, o que diminui o efeito da vazão volumétrica na dissolução. Nota-se também que FD não sofre influência da vazão mássica (W).

Apenas com esses resultados não se pode avaliar de maneira quantitativa o efeito que W e Q exercem no processo dissolutivo, mas que poderá ser avaliado de maneira mais consistente através dos resultados obtidos experimentalmente para tomada de concentração para determinação da cinética de dissolução em diferentes condições operacionais.

Percebe-se também, através da tabela 10, pequenos desvios obtidos na realização das triplicatas. Para a vazão volumétrica de salmoura observa-se um desvio máximo 6% entre o menor e o maior valor de Q. Já para a vazão mássica de sólidos tem-se um desvio máximo de 3% entre o menor e o maior valor de W.

Tabela 10 - Resultado para o fator de dissolução (FD).

Experimentos	Q (L/s)	Q _{médio} (L/s)	W (g/s)	W _{médio} (g/s)	FD (%)	FD _{médio} (%)
1	0,98		23,72		98,0	
	1,02	0,99 ± 0,03	23,21	23,49 ± 0,26	97,4	97,83 ± 0,38
	0,97		23,53		98,1	
2	1,03		47,79		98,5	
	1,01	1,01 ± 0,02	47,35	47,44 ± 0,32	98,5	98,53 ± 0,06
	0,99		47,17		98,6	
3	1,99		24,32		94,8	
	1,90	1,96 ± 0,06	23,25	23,86 ± 0,55	96,5	95,30 ± 1,04
	2,00		24,01		94,6	
4	2,05		48,68		94,9	
	2,00	2,03 ± 0,03	48,78	48,35 ± 0,65	94,8	94,87 ± 0,06
	2,03		47,60		94,9	

O teste ANOVA de fator simples foi utilizado para averiguar se os resultados obtidos em triplicata estavam dentro do nível de confiança de 95%. Este teste é uma análise de variância que visa verificar se existe uma diferença significativa entre as médias, caso essa diferença não seja significativa (p -valor $> 0,05$) pode-se dizer que, estatisticamente, os experimentos realizados em triplicata são realmente réplicas.

Através do teste ANOVA pôde-se comprovar que a triplicata realizada nos quatro experimentos para as variáveis Q e W, são réplicas com 95% de confiança, conforme é demonstrado na tabela 11.

Tabela 11 - Teste ANOVA realizado para as variáveis Q e W em triplicata.

Variáveis	p - valor	Significância
Vazão volumétrica (Q)	0,997	Não significativo
Vazão mássica (W)	0,998	Não significativo

5.7 Resultados para as tomadas de concentração

Na tabela 12 são demonstrados os resultados obtidos experimentalmente das tomadas de concentração ao longo da posição na realização do experimento 1 em triplicata. Pode-se observar que a concentração aumenta com o aumento da distância de escoamento e que há uma grande dissolução de sólidos nos primeiros metros de escoamento. Este fenômeno também é observado nos outros três experimentos. Ressalta-se também um pequeno desvio padrão médio no valor de 1,58.

Tabela 12 - Dados da tomada de concentração ao longo da posição para o experimento 1 em triplicata.

Posição (m)	Conc. (g/l) Exp.1a	Conc. (g/l) Exp.1b	Conc. (g/l) Exp.1c	Média da triplicata (g/l)	Desvio padrão (δ)
5,5	48,67	49,00	49,33	49,00	0,33
13,0	51,33	53,33	55,00	53,22	1,84
20,5	51,67	54,67	55,33	53,89	1,95
26,7	52,00	55,67	56,00	54,56	2,22
Desvio Padrão Médio					1,58

O teste ANOVA foi aplicado para comprovar que a triplicata realizada para o experimento 1 são réplicas com 95% de confiança, conforme é demonstrado na tabela 13.

Tabela 13 - Teste ANOVA realizado para o experimento 1 em triplicata.

p-valor	0,289
Significância	Não significativo

O teste t também foi realizado para analisar se duas amostras diferentes, possuem a uma média dentro de um nível de confiança de 95%. Quando este teste é realizado e obtém-se um p-valor $< 0,05$ significa dizer que essa diferença é significativa, no entanto se p-valor $> 0,05$ essa diferença não é significativa.

Os resultados do teste t são apresentados na tabela 14 e pode-se verificar que a partir da posição de 13 metros, a diferença entre as concentrações não são significativas, permitindo afirmar que a partir desta posição, estatisticamente, a concentração da solução é constante. Tal comportamento indica que o processo de dissolução é muito mais efetivo nos primeiros metros do escoamento. Isso acontece porque, ao longo da calha, ocorre uma significativa dissolução das partículas de sal reduzindo assim a área de transferência de massa. Além disso, com a dissolução das partículas ocorre um aumento na concentração da solução salina o que reduz o gradiente de concentração, que é a força motriz do processo de dissolução. Em outras palavras, este comportamento é observado porque a cinética de dissolução do sal decresce com a diminuição da área de troca de transferência de massa e com a redução do gradiente de concentração. Esses dois efeitos combinados geram uma cinética de transferência de massa próxima de zero a partir dos 13m.

Tabela 14 - Teste t realizado para os pares de amostras de concentração do experimento 1 ao longo da posição.

Pares de concentração média (g/L)	49,00 e 53,22	53,22 e 53,89	53,22 e 54,6
Intervalo entre as posições (m)	5,5 a 13,0	13,0 a 20,5	13,0 a 26,7
p-valor	0,0400	0,1835	0,1202
Significância	Significativo	Não significativo	Não significativo

O mesmo procedimento de avaliação dos resultados do experimento 1 também foi realizado para experimentos 2, 3 e 4, assim como seus respectivos testes ANOVA e testes t, os quais podem ser encontrados no anexo II.

A tabela 15 apresenta um resumo dos resultados dos quatro experimentos obtidos através das tomadas de concentração realizadas em triplicata. Pode-se verificar, nos demais experimentos, o mesmo comportamento para a dissolução do sal, ou seja, independente das condições operacionais utilizadas, a maior dissolução do NaCl ocorre nos 13 primeiros

metros do escoamento sendo as concentrações seguintes estaticamente idênticas. Cabe acrescentar que o teste ANOVA realizado indica que a triplicata dos experimentos representam réplicas com um nível de confiança de 95% e que a partir de 13 metros de escoamento a diferença entre as concentrações não são significantes.

Tabela 15 - Resultado das tomadas de concentração em cada posição para os 4 experimentos.

Posição (m)	Conc. (g/L)	Conc. (g/L)	Conc. (g/L)	Conc. (g/L)
	Exp. 1 $\delta = \pm 1,6$	Exp. 2 $\delta = \pm 1,2$	Exp. 3 $\delta = \pm 0,8$	Exp. 4 $\delta = \pm 1,0$
5,5	49,0	65,6	39,6	43,7
13,0	53,2	69,6	42,3	50,1
20,5	53,9	70,6	42,7	51,2
26,7	54,6	71,4	43,9	53,3

Onde δ é o desvio médio padrão obtido na realização dos experimentos em triplicata.

5.8 Estimação do Coeficiente Global de Transferência de Massa

A princípio sabe-se que o coeficiente convectivo de transferência de massa (k) é uma função do número de Reynolds e temperatura, como pode ser observado na equação 39.

$$k = k_0 \cdot f(Re) \cdot f(T), \quad (39)$$

onde k_0 é uma constante proporcional.

Para o cálculo do número de Reynolds é dada a equação 40 (BIRD *et al.*, 2002).

$$Re = \frac{D \cdot \bar{v}_z \cdot \rho}{\mu}, \quad (40)$$

onde Re é o número de Reynolds, D é o diâmetro da seção circular, \bar{v}_z é a velocidade no sentido axial, ρ é a densidade da solução e μ é a viscosidade da solução.

A determinação de v_z pode ser obtida através da equação 41.

$$\bar{v}_z = \frac{Q}{A_{esc}}, \quad (41)$$

onde Q é a vazão volumétrica da solução e A_{esc} é a área transversal ao escoamento, na qual foi determinada no tópico 5.1.

O cálculo do diâmetro (D) é dado pela correlação de diâmetro hidráulico, como é demonstrado na equação 42.

$$D = \frac{4 \cdot A_{esc}}{P}, \quad (42)$$

onde A_{esc} é a área transversal ao escoamento e P é o perímetro molhado determinado no tópico 5.1.

Dessa forma pode-se determinar o número de Reynolds para as duas condições de vazão utilizada neste estudo, como é demonstrado na tabela 16.

Observa-se através da tabela 16 que nessas condições o regime é de plena turbulência. No entanto, Bird *et al.* (2002) diz que para $Re > 10^4$ observa-se a independência de k em relação ao número de Reynolds.

Tabela 16 - Número de Reynolds para cada condição de vazão volumétrica.

Q (L/s)	Re
1,0	40078
2,0	62545

Para este estudo notou-se pouca diferença entre a temperatura inicial e final do fluido, que foi aproximadamente de 3°C. Dessa forma, devido à pequena queda de temperatura ao longo do escoamento, considerou-se o coeficiente convectivo de transferência de massa independente da temperatura.

Sendo assim, para este estudo, o coeficiente k pôde ser estimado como uma constante, independentemente tanto do número de Reynolds quanto da temperatura.

O coeficiente global de transferência de massa foi obtido com base nos dados experimentais através da regressão do sistema de equações algébricas diferenciais (EAD's). O método utilizado para a estimação do parâmetro foi o da máxima verossimilhança, com o pacote MAXIMA em linguagem FORTRAN. Na tabela 17 está apresentado o valor e o desvio do parâmetro estimado.

Pode-se perceber através da tabela 17 que o desvio obtido foi uma ordem de grandeza menor que o coeficiente k , apresentando 6% de desvio entre o mínimo e o máximo valor do coeficiente estimado.

Tabela 17 - Valor estimado do coeficiente global de transferência de massa.

Parâmetro	Valor (m/s)	δ (desvio)
k	$5,44 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$

Observa-se que este valor é maior do que o encontrado por Aksel'Rud *et al.* (1992), onde seu valor foi de $1,0 \cdot 10^{-4}$. Isto pode estar relacionado ao fato de o autor ter utilizado

partículas cilíndricas com diâmetro e altura de 9,0 mm, enquanto que as partículas neste estudo possuem um diâmetro médio de 1,75 mm, possuindo uma área superficial de troca mássica muito maior. Outro fator que pode ser levado em consideração é que o autor não diz o número de Reynolds em que foi realizado os experimentos, podendo ter trabalhado em regiões fora da plena turbulência que foi o caso deste estudo.

5.9 Resultados da simulação computacional

Os resultados obtidos através da simulação computacional da dissolução de cloreto de sódio em salmoura com o coeficiente global de transferência de massa estimado podem ser observados nas figuras 39, 41 e 42.

Pode-se observar através da figura 39 que a curva obtida através do modelo matemático possui o mesmo comportamento apresentado pelos dados experimentais, onde a dissolução é muito mais efetiva nos primeiros 7 metros de escoamento, a partir desta posição, a curva se torna mais suavizada, mostrando uma menor dissolução da massa de sal.

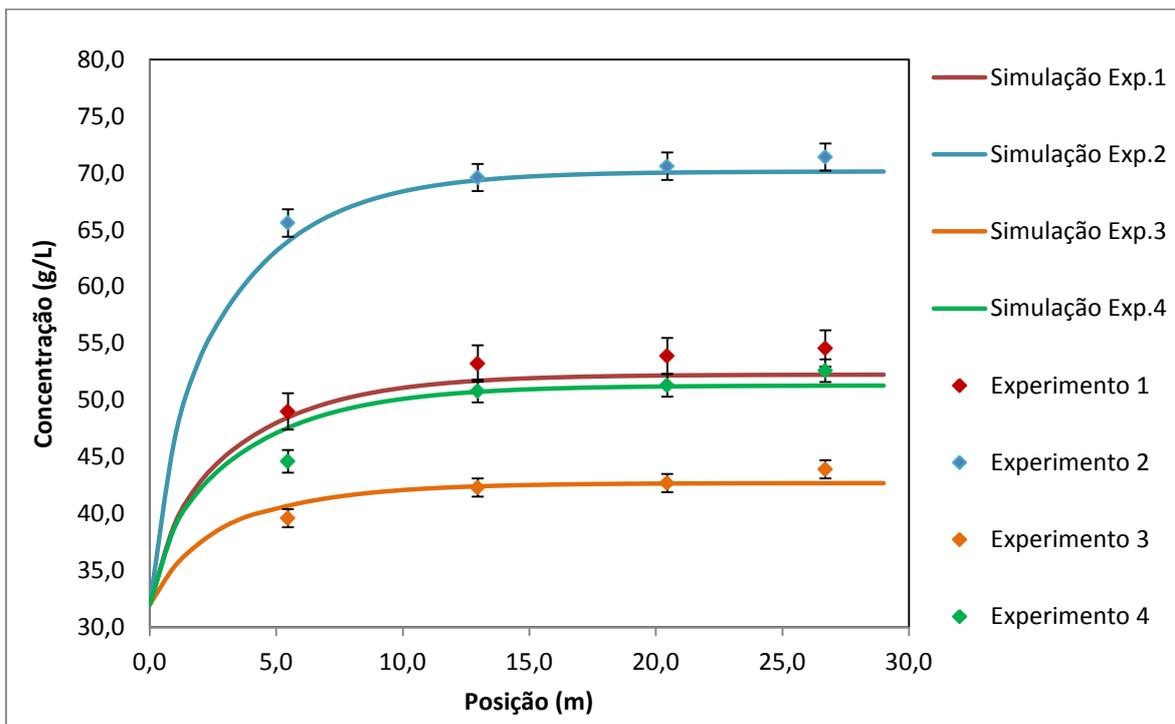


Figura 39 - Dados experimentais e simulados de concentração de sal em função da posição.

Para avaliar o efeito que a vazão de sólidos (W) tem nesse processo dissolutivo, foram analisados os pares de experimento (1 e 2) e (3 e 4). O primeiro par analisado é o experimento 1 (Q_{\min} e W_{\min}) e experimento 2 (Q_{\min} e W_{\max}). O segundo par considerado é o experimento 3 (Q_{\max} e W_{\min}) e experimento 4 (Q_{\max} e W_{\max}). Para esses dois pares de

experimentos a vazão volumétrica (Q) foi mantida constante, podendo-se observar que quanto maior a vazão de sólidos maior será o processo de dissolução, pois há uma maior quantidade de sal disponível que é fornecida na alimentação.

Analisando-se o efeito que a vazão volumétrica de solução (Q) tem nesse processo dissolutivo, foram avaliados os pares de experimento (1 e 3) e (2 e 4), onde a vazão mássica (W) foi mantida constante. Observa-se que com o aumento da vazão de líquido, menor será processo dissolutivo, pois o tempo de contato entre o sal e a salmoura diminui, promovendo assim, uma menor taxa de dissolução de sólidos na salmoura.

Na tabela 18 estão apresentados os valores dos desvios relativos dos dados experimentais em relação ao modelo, onde o desvio relativo em porcentagem é dado pela equação 43. Percebe-se nesta tabela que obteve-se pequenos desvios relativos médios, com um valor máximo de aproximadamente 3% para o experimento 1. Os pequenos valores dos desvios mostram que a modelagem estudada consegue prever de maneira satisfatória os dados experimentais.

$$Desvio\ relativo(\%) = \frac{C_{exp} - C_{sim}}{C_{exp}} \cdot 100 , \quad (43)$$

Tabela 18 - Desvios entre as concentrações experimentais e as concentrações dadas pela simulação.

Posição (m)	Exp. 1 Desvio Relativo (%)	Exp. 2 Desvio Relativo (%)	Exp. 3 Desvio Relativo (%)	Exp. 4 Desvio Relativo (%)
5,5	-0,01	1,60	-3,56	-8,18
13,0	3,76	1,84	0,26	0,93
20,5	3,53	1,39	0,26	0,49
26,7	4,53	2,18	2,87	2,74
Desvio Médio Relativo (%)	2,95	1,75	-0,04	-1,01

Na figura 40 está apresentada uma comparação entre os resultados para a concentração da solução obtida experimentalmente e a concentração obtida utilizando o modelo. A reta $x = y$ mostra a proximidade dos valores simulados de concentração em relação aos dados experimentais. Através desta figura pode-se perceber que os pontos estão próximos à reta, confirmando que a modelagem mostrou-se satisfatória para a dissolução de NaCl durante o escoamento em salmoura.

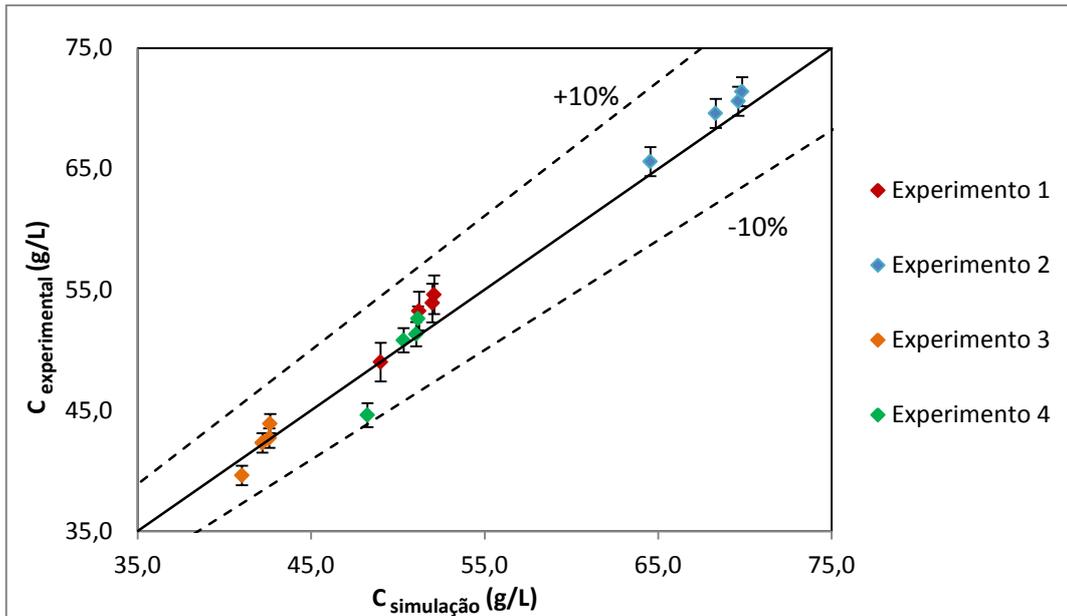


Figura 40 - Comparação entre a concentração obtida experimentalmente e a dada pela simulação.

Na figura 41, são apresentados os desvios relativos entre os valores de concentração experimental e os valores da concentração obtidos pela simulação computacional. Pode-se perceber a proximidade dos pontos em relação à reta $y = 0$, onde os desvios apresentados são menores que 10%, o que mostra a eficiência do modelo em simular os dados experimentais. Observa-se também uma predominância de desvios positivos, mostrando que o modelo estudado superestima levemente os dados experimentais.

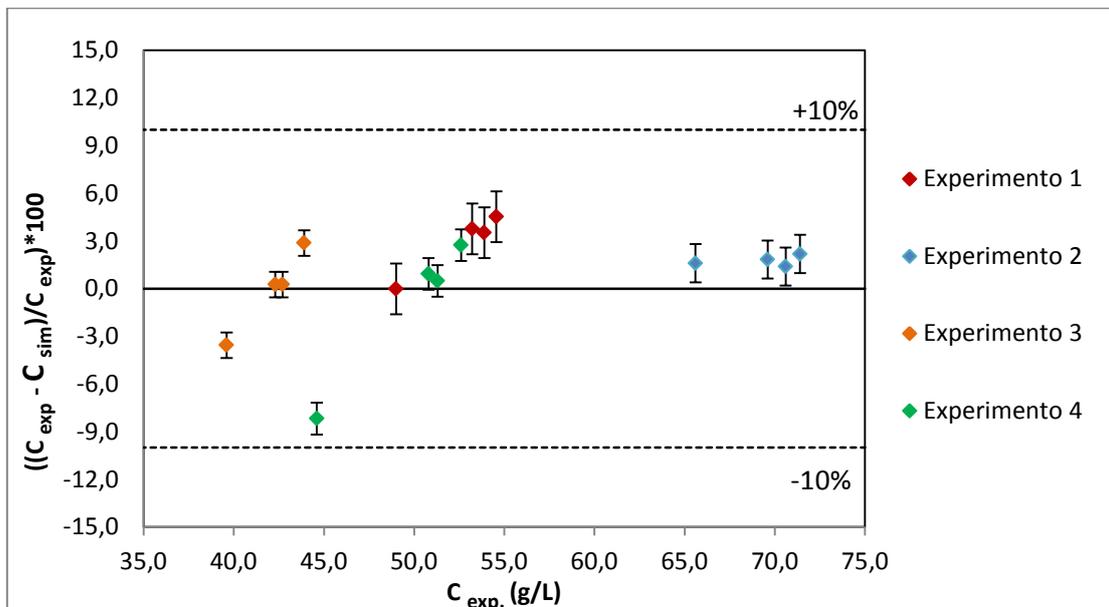


Figura 41- Desvio relativo da concentração obtida pela simulação em comparação com os dados experimentais.

A análise dos resultados experimentais confrontados com os dados ajustados pelo modelo, apresentados na tabela 18 e figuras 40 e 41, mostra pequenos desvios relativos onde tem-se um erro máximo de 8%. Os baixos desvios mostram que o modelo proposto para a dissolução de partículas de cloreto de sódio durante o escoamento em salmoura, com o parâmetro estimado como uma constante, prevê de maneira satisfatória os dados experimentais.

Para a temperatura e a fração mássica de sólidos não foram feitos testes experimentais, apenas os dados de concentração foram medidos experimentalmente.

Na figura 42 está apresentada a simulação da variação da fração volumétrica de sólidos. Pode-se observar nesta figura que nos primeiros 7 metros de escoamento grande parte dos sólidos se dissolveram, e devido aos valores de fração volumétrica de sólidos serem próximos de zero a partir de 13 metros de escoamento, mostra que praticamente não há dissolução a partir desta posição.

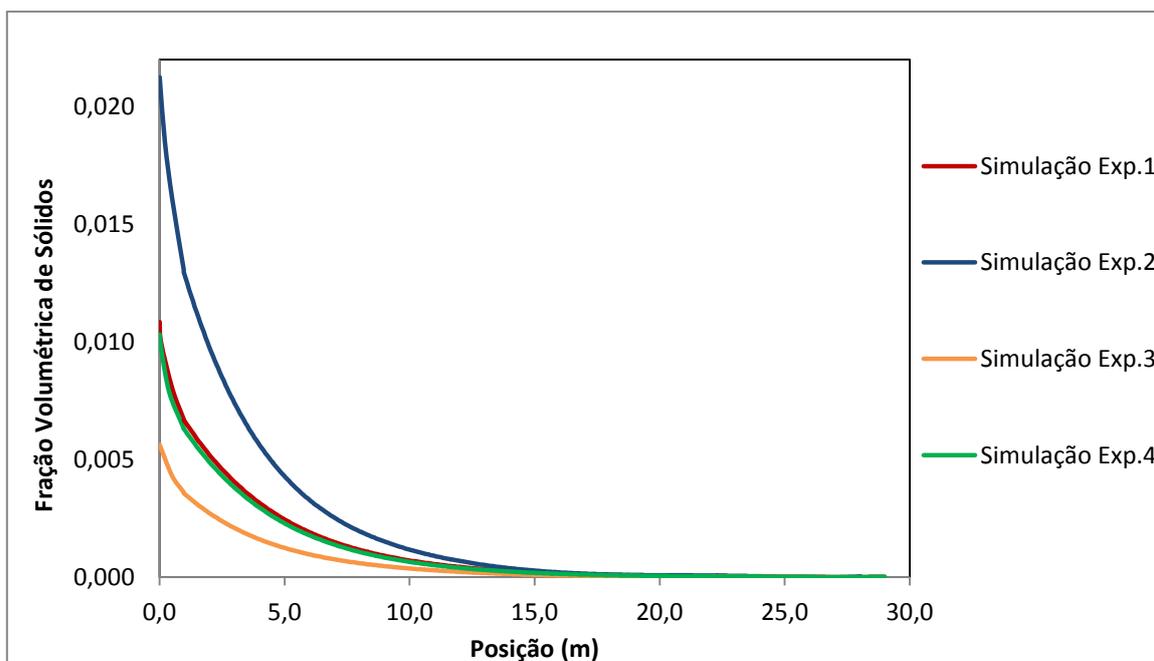


Figura 42 - Resultados obtidos para a simulação dos dados de fração volumétrica de sólidos em função da posição.

Na figura 43 está apresentada a simulação do perfil de temperatura em função da posição. Lembrando as condições operacionais de cada experimento, tem-se para o experimento 1 (Q_{\min} e W_{\min}), experimento 2 (Q_{\min} e W_{\max}), experimento 3 (Q_{\max} e W_{\min}) e experimento 4 (Q_{\max} e W_{\max}).

A partir dos resultados apresentados na figura 44, pode-se observar que quanto maior a taxa de adição de sólidos (W) em um menor volume de líquido maior será a queda

de temperatura devido a uma maior dissolução endotérmica, ou seja, quanto maior a fração volumétrica de sólidos na alimentação, maior será a queda de temperatura.

Sabendo que curva amarela é a simulação do experimento 3, esta é a que possui menor queda de temperatura, pois este experimento possui a menor taxa de alimentação de sólidos em uma vazão volumétrica máxima. Já a curva azul é a simulação do experimento 2 é a que possui maior queda de temperatura. Isto ocorre porque a este experimento possui a maior taxa de alimentação de sólidos em uma menor vazão volumétrica de solução.

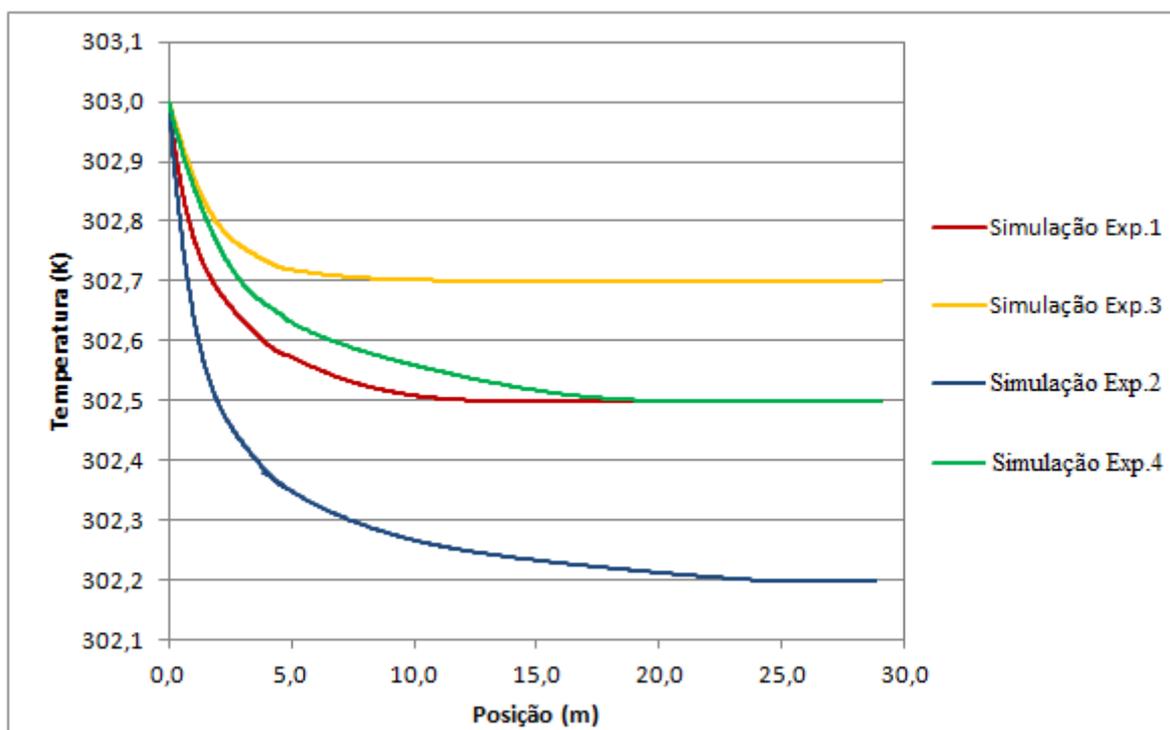


Figura 43 - Resultados obtidos para a simulação dos dados de temperatura em função da posição.

A temperatura não foi medida experimentalmente, mas pôde-se perceber um decréscimo máximo de temperatura, aproximadamente, de 3°C, entretanto o modelo proposto apresentou uma queda máxima de 0,8°C. Essa pequena queda de temperatura se deve a desconsideração dos termos Q_1 (taxa de calor perdida por convecção) e Q_3 (taxa de calor perdida pela condução), descritos no balanço de energia da equação 16. Futuramente esses termos serão acrescentados na modelagem para avaliar o perfil de temperatura ao longo do escoamento durante a dissolução de NaCl.

5.10 Resultados para a validação do modelo

Para validar o modelo matemático foi realizado um experimento em triplicata, fora da malha experimental, com vazão volumétrica de salmoura (Q) e vazão de alimentação de sólidos (W) diferente das condições operacionais utilizadas inicialmente. Os valores

estipulados de Q e W foram aproximadamente 1,5 L/s e 36 g/s respectivamente, como é demonstrado na tabela abaixo.

Os resultados da tabela 19 mostram os altos valores do fator de dissolução (FD), isto se deve à baixa concentração de salmoura que está muito distante do ponto de saturação, o que facilita a dissolução das partículas de sal.

Tabela 19 – Resultados do fator de dissolução (FD) para o experimento fora da malha.

Q (L/s)	Q_{médio} (L/s)	W (g/s)	W_{médio} (g/s)	FD (%)	FD_{médio} (%)
1,45		35,60		95,3	
1,47	1,46 ± 0,01	35,56	35,90 ± 0,55	96,3	96,0 ± 0,61
1,46		36,53		96,4	

Na tabela 20 são demonstrados os resultados obtidos experimentalmente das tomadas de concentração ao longo da posição na realização do experimento fora da malha em triplicata. Observa-se uma maior dissolução do NaCl nos 13 primeiros metros do escoamento sendo as concentrações seguintes estaticamente idênticas, que pode ser comprovado através do teste ANOVA.

Tabela 20 - Dados da tomada de concentração ao longo da posição para o experimento fora da malha experimental em triplicata.

Posição (m)	Conc. (g/l) Exp.(a)	Conc. (g/l) Exp.(b)	Conc. (g/l) Exp.(c)	Média da triplicata (g/l)	Desvio padrão (δ)
5,5	44,87	44,79	45,40	45,02	0,33
13,0	51,02	51,58	52,30	51,63	0,64
20,5	51,26	51,66	52,74	51,89	0,77
26,7	53,09	53,26	53,82	53,89	0,38
Desvio Padrão Médio					0,53

O teste ANOVA foi aplicado e pôde-se comprovar que o experimento realizado em triplicata são réplicas com 95% de confiança, conforme é mostrado na tabela II.24 do anexo II.

Os resultados do teste t obtidos para os experimentos fora da malha são apresentados na tabela II.25 do anexo II. Pode-se verificar o mesmo comportamento dos dados obtidos na malha experimental, onde a partir da posição de 13 metros de escoamento a diferença entre as concentrações não são significativas, permitindo afirmar que a partir desta posição, estatisticamente, a concentração da solução permanece constante.

A simulação computacional realizada para a validação do modelo foi feita utilizando o coeficiente global de transferência de massa estimado através da malha experimental, com o valor de $5,44 \times 10^{-4}$ m/s. Dessa forma pode-se avaliar se o modelo consegue prever de maneira satisfatória os dados experimentais utilizando o coeficiente estimado em experimentos fora da malha.

Na figura III.1 do anexo III estão demonstrados os dados experimentais e simulados de concentração de sal em função da posição obtida através do modelo matemático para o experimento fora da malha. Pode-se observar o mesmo comportamento apresentado pelos dados da malha experimental, onde a dissolução é muito mais efetiva nos primeiros 7 metros de escoamento, a partir desta posição, a curva se torna mais suavizada, mostrando uma menor dissolução da massa de sal.

Pode-se observar o mesmo comportamento para o experimento fora da malha experimental na simulação da variação da fração volumétrica de sólidos. Através da figura III.2 do anexo III percebe-se que nos primeiros 7 metros de escoamento grande parte dos sólidos se dissolveram, e devido aos valores de fração volumétrica de sólidos serem próximos de zero a partir de 13 metros de escoamento, mostra que praticamente não há dissolução a partir desta posição.

Para a análise da simulação do perfil da queda de temperatura pode-se perceber comportamento similar aos dados obtidos na malha experimental. Na figura III.3 do anexo III pode-se observar uma pequena queda de temperatura no valor de $0,5^{\circ}\text{C}$, pois os termos Q1 (taxa de calor perdida por convecção) e Q3 (taxa de calor perdida pela condução) foram desconsiderados no balanço de energia da equação 16.

Na tabela 21 estão apresentados os valores dos desvios relativos dos dados experimentais em relação aos dados simulados de concentração. Percebe-se nesta tabela que obteve-se pequenos desvios relativos médios, com um valor máximo 6%. Os pequenos valores dos desvios mostram que a modelagem estudada consegue prever de maneira satisfatória os dados experimentais.

Tabela 21 - Desvios entre as concentrações experimentais e as concentrações dadas pela simulação para os dados fora da malha experimental.

Posição (m)	Desvio Relativo (%) (Exp - Sim)/Exp
5,5	-6,00
13,0	-0,99
20,5	-1,77
26,7	1,84
Desvio Médio Relativo (%)	-1,73

A análise dos resultados obtidos para os dados fora da malha mostra que modelo estudado consegue prever de maneira satisfatória os dados experimentais utilizando o coeficiente global de transferência de massa, no qual foi estimado utilizando a malha experimental. A eficácia do modelo estudado é comprovada pelos baixos desvios obtidos com um desvio máximo de 6%.

6 CONCLUSÕES

Dentro das condições operacionais utilizadas e para os resultados obtidos experimentalmente, pode-se concluir que com o aumento da vazão de líquido há uma menor taxa de dissolução de sólidos devido ao menor tempo de contato do sal com a salmoura. Entretanto, com o aumento da vazão de sólidos, maior será o processo de dissolução, pois há uma maior quantidade de sal disponível na mistura.

Percebe-se que o valor estimado de k como uma constante pode ser utilizado na modelagem proposta, pois as vazões volumétricas utilizadas neste trabalho estão em regime turbulento pleno, fazendo com que haja pouca influência do grau de turbulência no coeficiente convectivo global de transferência de massa e devido à pequena queda de temperatura durante o experimento, também pode-se considerar a independência de k em relação à temperatura.

Dentro das condições operacionais utilizadas nos experimentos para a simulação computacional da dissolução de partículas NaCl no escoamento em salmoura, pode-se concluir que os baixos desvios mostram que o modelo estudado, com o coeficiente convectivo global de transferência de massa (k) estimado para os quatro experimentos como uma constante, descreve de maneira satisfatória as quatro condições experimentais no processo da dissolução em questão.

A modelagem proposta para o estudo da dissolução de sais em salmoura, consegue prever a alta dissolução nos primeiros metros e a partir de 13 metros de escoamento a concentração se matem constante, devido aos valores de fração volumétrica de sólidos serem próximos de zero, mostrando que praticamente não há dissolução a partir desta posição.

Os resultados obtidos do ensaio realizado fora da malha mostram que o modelo estudado pode ser validado, pois os dados simulados do perfil de concentração utilizando o coeficiente global de transferência de massa estimado a partir da malha experimental consegue prever de modo satisfatório os dados experimentais, com um desvio máximo de 6%.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Analisar o efeito dissolutivo em diferentes concentrações de alimentação de salmoura e avaliar o comportamento do modelo matemático nestas condições.

Realizar novos experimentos com mistura de diferentes sais, tais como: KCl, CaCl₂ e NaCl, analisando qual destes sais possuem maior efeito no processo dissolutivo em diferentes condições operacionais.

Trabalhar com temperaturas diferentes da temperatura ambiente para avaliar o efeito sobre o coeficiente convectivo de transferência de massa (k).

Ajustar a modelagem em relação ao balanço de energia incluindo as taxas de calor perdida por convecção e por condução.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-AAL, H.K. & AGGOUR, M. Petroleum and gas field processing. Marcel Dekker, Inc. New York Basel, 2003.

AHMED, T. H. Reservoir Engineering Handbook. Elsevier. Houston, 2000.

AKSEL'RUD, G.A., BOIKO, A.E. & KASHCHEEV, A.E. "Kinetics 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, 201-219, (1997).

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

ASSIS, A. P. "A Method for Evaluation the Transient Creep of Potash". Tese de doutorado. University of Alberta, 1990.

BAEHR, H.D. & STEPHAN, K. Heat and Mass Transfer. 2a ed. Springer, 2006.

BENÍTEZ, J. Principles and Modern Applications of Mass Transfer Operation. 2ª edição. Wiley, 2009.

BENNETT, C.O. & MYERS, J.E. Fenômenos de Transporte. Editora McGraw-Hill do Brasil, Ltda., 1978.

BILLO, S. M. "Geology of marine evaporites favorable for oil, gas exploration". Oil and Gas Journal, feb 05, p 69-73, (1996).

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

BOTELHO F. V. C. "Análise Numérica do Comportamento Mecânico do Sal em Poços de Petróleo". DISSERTAÇÃO DE MESTRADO, PUC- RJ, 2008

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

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

- CHAPMAN, R.E. Petroleum Geology. Elsevier Science Publishers B.V., 1983.
- COSTA, A. M. “Uma Aplicação de Métodos Computacionais e Princípios de Mecânica das Rochas no Projeto e Análise de Escavações destinadas a Mineração Subterrânea”. Tese de Doutorado. UFRJ, 1984.
- COSTA, A. M. *et al.*, “Perfuração de longas camadas de sal na Bacia de Campos”, Rio Oil & Gas Expo and Conference, Rio de Janeiro, Brasil, 16-19 Outubro de 2000.
- COSTA, A. M.; POIATE JR., E.; FALCÃO, J. L. & COELHO L. F. M. “Triaxial Creep Tests in Salt Applied in Drilling Through Thick Salt Layers in Campos Basin”. Brazil, IADC/SPE, 92629, 2005.
- COX, R.A, MCCARTNEY, M.J, CULKIN, F., “Deep-Sea Res”. 17, 679 – 689 (1970).
- CREMASCO, M. A. Fundamentos de Transferência de Massa. 2a edição. Editora Unicamp, 2002.
- 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., june 1964, pp. 183-190.
- Energy Information Administration. Petroleum: An Energy Profile. DOE/EIA 0545(99). Julho de 1999.
- FARMER, P.; MILLER, D.; WOODS, R. Exploring the Subsalt. Oil Field Review. P. 50-64. Gatwick, 1996.
- FINNERAN, D. W. & MORSE J. W., “Calcite Dissolution Kinetics in saline waters”. Elsevier, chemical geology 268, 137-146, (2009).
- FREITAS, J. T. R. “Ciclos Depositionais Evaporíticos da Bacia de Santos: Uma Análise Cicloestratigráfica a Partir de Dados de 2 Poços e de Traços de Sísmica”. Dissertação, UFRGS, 2006.
- HAWKINS, M. *et al.* “Applied Reservoir Engineering”. Prentice Hall PTR. Estados Unidos, 1991.
- IEA (International Energy Agency). Energy Technology Perspectives 2010: “Scenarios & Strategies to 2050, 2010”.
- INCROPERA, DEWITT, BERGMAN, LAVINE. “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”. Sixth edition, 2007, Wiley Editor.
- LIDE, D. R., CRC Handbook Chemistry and Physics, 90ª Edition, 2009 – 2010.

- LOUIS LEITHOLD. “O Cálculo com Geometria Analítica”, Vol. 1, 3ª Edição, 2002.
- MAGALHÃES, S. C. “Análise da Dissolução Dinâmica de Sal Comercial em Salmoura”. Monografia, UFRRJ, 2009.
- 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.
- MASSARANI, G., “Fluidodinâmica em Sistemas Particulados”, Vol. 1, 2ª Edição, 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).
- 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.
- MORSE, J. W. & ARVIDSON R. S., “The dissolution kinetics of major sedimentary carbonate minerals”. Elsevier, Earth-science reviews 58 (2002) 51-84.
- NASCIMENTO, A. “Exploração de petróleo em camadas do pré-sal no Brasil: um estudo de caso no poço 1-sps-50”. Dissertação de mestrado, UFIItajubá, 2010.
- OLIVEIRA, J. E.; IDAGAWA, L. S.; NOGUEIRA, E. C. “Evaporitos na Bacia de Campos, Aspectos Geológicos e Problemas de Perfuração”. PETROBRAS/CENPES-475, 1985.
- PERRY, R. H. & CHILTON, H. C. Chemical Engineering Manual. Fifth edition. Guanabara Dois Editor, São Paulo: 1980.
- PETROBRAS, <http://www.petrobras.com.br/presal> acessado em 5 de junho de 2012.
- POIATE, E. JR.; COSTA, A. M.; FALCÃO, J. L. “Well Design for Drilling Through Thick Evaporite Layers in Santos Basin”. Brazil, IADC/SPE, 99161, 2006.
- SACHSENHOFER, R. Handbook of Petroleum Gology. Mining University of Leoben. School of Petroleum Engineering. Apostila não publicada. Leoben, 2009.
- SHARMA, K.R. Principles of Mass Transfer. Easter Economy Edition, PHI, 2007.
- SILVA, R. A.; OLIVEIRA, T. J. L., MARTINS, A. L. ” Previsão de Alargamento de Poços Perfurados em Domos Salinos com Fluido Não-Saturado”, ENAHPE 2006.

SILVA, M. A. M., SCHREIBER, B. C., & SANTOS, C. L. Evaporitos como Recursos Minerais. *Brazilian Journal of Geophysics* 18, 3 (2000), 337-350.

THOMAS, D. G. "Non-Newtonian suspensions, Part I". *Ind. Eng. Chem.*, 55: 18-29, Nov. 1963.

THOMAS, J. E. *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*. 2ª edição. Editora Interciência, 2004.

TREYBAL, R.E. *Mass-Transfer Operation*. 3a ed. McGraw-Hill Book Company, 1981.

TRIGGIA, A. A. *et al.*, "Fundamentos de engenharia de petróleo." Rio de Janeiro: Interciência/PETROBRAS, 2001.

WILLSON, S. M. & FREDRICH J. T. "Geomechanics Considerations for Through an Near Salt Well Design", SPE 95621, (2005).

WILSON, S.M. *et al.*, "Drilling Salt formations Offshore With Seawater Can Significantly Reduce Well Costs", SPE 87216. *SPE Drilling & Completion*, Richardson, USA, v. 19, n. 3, p. 147-155, june 2004

ANEXO I

DADOS FÍSICO-QUÍMICOS

Tabela I.1: Dados físico-químicos utilizados no modelo matemático.

Descrição	Parâmetros	Valor	Bibliografia
Coefficiente de Transferência de Calor na T= 300K	h	$0,0264 \frac{W}{m.K}$	CRC Handbook ,2009.
Calor de Dissolução de NaCl	q_d	$3880 \frac{J}{mol}$	CRC Handbook ,2009.
Massa específica da solvente	$\rho_{solvente}$	$1000 \frac{kg}{m^3}$	Perry, Green, 1999.
Massa específica do sólido	ρ_{sal}	$2165 \frac{kg}{m^3}$	Kaufmann, Dale W., 1960.
Calor específico da solução	cp	$3993 \frac{J}{kg.K}$	Cox <i>et al.</i> , <i>Deep Sea Res.</i> , 1970, 17, 679
Condutividade térmica do PVC	k_{PVC}	$0,156 \frac{W}{m.K}$	Perry, Green, 1999.
Viscosidade cinemática do fluido	μ	$0.001 \frac{kg}{m.s}$	Perry, Green, 1999.
Massa molar do NaCl	MM	$58,5 \frac{kg}{kmol}$	Perry, Green, 1999.
Concentração de saturação de NaCl	C^*	$360 \frac{kg}{m^3}$	Perry, Green, 1999.

ANEXO II

DADOS EXPERIMENTAIS

II.1 Experimento 1

Tabela II.1- Condições operacionais para a realização do experimento 1 em triplicata.

Condições operacionais	Exp.1a	Exp.1b	Exp.1c	Média
Q Vazão de líquido (l/s)	0,98	1,02	0,97	0,99
W (Vazão Mássica) (kg/s)	23,72	23,21	23,53	23,49

Tabela II.2- Dados para o experimento 1 em triplicata.

Dados	Exp.1a	Exp.1b	Exp.1c	Média
Granulometria das partículas \bar{D}_p (mm)	1,72	1,82	1,71	1,75
Massa de sólido alimentado (g)	2890,9	2828,4	2902,3	2873,9
Massa de sólido recolhido no final (g)	57,6	72,9	54,9	61,8
Fator de dissolução (%)	98,0	97,4	98,1	97,8

Tabela II.3- Dados da tomada de concentração ao longo da posição para o experimento 1 em triplicata.

Posição (m)	Conc. (g/l) Exp.1a	Conc. (g/l) Exp.1a	Conc. (g/l) Exp.1a	Média da triplicata (g/l)	Desvio padrão (δ)
5,5	48,67	49,00	49,33	49,0	0,33
13,0	51,33	53,33	55,00	53,2	1,84
20,5	51,67	54,67	55,33	53,9	1,95
26,7	52,00	55,67	56,00	54,6	2,22
				Desvio Padrão Médio	1,58

Tabela II.4- Teste ANOVA realizado para o experimento 1 em triplicata.

p-valor	0,289
Significância	Não significativo

Tabela II.5- Teste t realizado para os pares de amostras de concentração do experimento 1 ao longo da posição.

Pares de concentração média (g/L)	49,00 e 53,22	53,22 e 53,89	53,22 e 54,6
Intervalo entre as posições (m)	5,5 a 13,0	13,0 a 20,5	13,0 a 26,7
p-valor	0,0400	0,1835	0,1202
Significância	Significativo	Não significativo	Não significativo

II.2 Experimento 2

Tabela II.6- Condições operacionais para a realização do experimento 2 em triplicata.

Condições operacionais	Exp.2a	Exp.2b	Exp.2c	Média
Q Vazão de líquido (l/s)	1,03	1,01	0,99	1,01
W (Vazão Mássica) (kg/s)	47,79	47,35	47,17	47,44

Tabela II.7- Dados para o experimento 2 em triplicata.

Dados	Exp.2a	Exp.2b	Exp.2c	Média
Granulometria das partículas \bar{D}_p (mm)	1,82	1,86	1,80	1,86
Massa de sólido alimentado (g)	2877,2	2864,9	2869,9	2870,7
Massa de sólido recolhido no final (g)	42,2	41,9	40,8	41,63
Fator de dissolução (%)	98,5	98,5	98,6	98,5

Tabela II.8- Dados da tomada de concentração ao longo da posição para o experimento 2 em triplicata.

Posição (m)	Conc. (g/l) Exp.2b	Conc. (g/l) Exp.2b	Conc. (g/l) Exp.2b	Média da triplicata (g/l)	Desvio padrão (δ)
5,5	66,00	65,33	65,33	65,55	0,39
13,0	71,67	68,00	69,00	69,56	1,90
20,5	72,33	69,67	69,67	70,56	1,54
26,7	72,67	71,33	70,33	71,44	1,17
Desvio Padrão Médio					1,25

Tabela II.9- Teste ANOVA realizado para o experimento 2 em triplicata.

p-valor	0,900
Significância	Não significativo

Tabela II.10- Teste t realizado para os pares de amostras de concentração do experimento 2 ao longo da posição.

Pares de concentração média (g/L)	65,55 e 69,56	69,56 e 70,56	69,56 e 71,44
Intervalo entre as posições (m)	5,5 a 13,0	13,0 a 20,5	13,0 a 26,7
p-valor	0,0453	0,0963	0,1222
Significância	Significativo	Não significativo	Não significativo

II.3 Experimento 3

Tabela II.11- Condições operacionais para a realização do experimento 3 em triplicata.

Condições operacionais	Exp.3a	Exp.3b	Exp. 3c	Média
Q Vazão de líquido (l/s)	1,99	1,90	2,00	1,96
W (Vazão Mássica) (kg/s)	24,32	23,25	24,01	23,86

Tabela II.12- Dados para o experimento 3 em triplicata.

Dados	Exp.3a	Exp.3b	Exp.3c	Média
Granulometria das partículas \bar{D}_p (mm)	1,66	1,62	1,64	1,64
Massa de sólido alimentado (g)	2851,9	2922,1	2904,2	2892,7
Massa de sólido recolhido no final (g)	147,9	101,6	157,1	135,5
Fator de dissolução (%)	94,8	96,5	94,6	95,3

Tabela II.13- Dados da tomada de concentração ao longo da posição para o experimento 3 em triplicata.

Posição (m)	Conc. (g/l) Exp.3b	Conc. (g/l) Exp.3b	Conc. (g/l) Exp.3b	Média da triplicata (g/l)	Desvio padrão (δ)
5,5	40,63	39,44	38,85	40,63	39,44
13,0	43,12	42,36	41,53	43,12	42,36
20,5	43,79	42,47	42,87	43,79	42,87
26,7	44,87	43,27	43,80	44,87	43,80
Desvio Padrão Médio					0,81

Tabela II.14- Teste ANOVA realizado para o experimento 3 em triplicata.

p-valor	0,561
Significância	Não significativo

Tabela II.15- Teste t realizado para os pares de amostras de concentração do experimento 3 ao longo da posição.

Pares de concentração média (g/L)	40,63 e 43,12	43,12 e 43,79	43,12 e 44,87
Intervalo entre as posições (m)	5,5 a 13,0	13,0 a 20,5	13,0 a 26,7
p-valor	0,0021	0,1852	0,0535
Significância	Significativo	Não significativo	Não significativo

II.4 Experimento 4

Tabela II.16- Condições operacionais para a realização do experimento 4 em triplicata.

Condições operacionais	Exp.4a	Exp.4b	Exp.4c	Média
Q Vazão de líquido (l/s)	2,05	2,00	2,03	2,03
W (Vazão Mássica) (kg/s)	48,68	48,78	47,60	48,35

Tabela II.17- Dados para o experimento 4 em triplicata.

Dados	Exp.4a	Exp.4b	Exp.4c	Média
Granulometria das partículas \bar{D}_p (mm)	1,62	1,61	1,60	1,60
Massa de sólido alimentado (g)	2911,7	2882,2	2904,2	2899,4
Massa de sólido recolhido no final (g)	147,4	150,1	149,9	149,1
Fator de dissolução (%)	94,9	94,8	94,9	94,9

Tabela II.18- Dados da tomada de concentração ao longo da posição para o experimento 4 em triplicata.

Posição (m)	Conc. (g/l) Exp.4a	Conc. (g/l) Exp.4b	Conc. (g/l) Exp.4c	Média da triplicata (g/l)	Desvio padrão (δ)
5,5	44,64	43,72	45,33	44,56	0,81
13,0	50,79	49,83	51,91	50,84	1,04
20,5	51,10	50,31	52,46	51,29	1,09
26,7	52,46	51,71	53,72	52,63	1,02
Desvio Padrão Médio					0,99

Tabela II.19- Teste ANOVA realizado para o experimento 4 em triplicata.

p-valor	0,748
Significância	Não significativo

Tabela II.20- Teste t realizado para os pares de amostras de concentração do experimento 4 ao longo da posição.

Pares de concentração média (g/L)	44,56 e 50,84	50,84 e 51,29	50,84 e 52,63
Intervalo entre as posições (m)	5,5 a 13,0	13,0 a 20,5	13,0 a 26,7
p-valor	0,000573	0,634	0,1005
Significância	Significativo	Não significativo	Não Significativo

II.5 Experimento fora da malha experimental

Tabela II.21- Condições operacionais para a realização do experimento fora da malha em triplicata.

Condições operacionais	Exp.(a)	Exp.(b)	Exp.(c)	Média
Q (Vazão de líquido) (l/s)	1,45	1,47	1,46	1,46
W (Vazão Mássica) (kg/s)	35,60	35,56	36,53	35,90

Tabela II.22- Dados para o experimento fora da malha em triplicata.

Dados	Exp.(a)	Exp.(b)	Exp.(c)	Média
Granulometria das partículas \bar{D}_p (mm)	1,72	1,69	1,65	1,69
Massa de sólido alimentado (g)	2940,2	2920,3	2925,0	2928,5
Massa de sólido recolhido no final (g)	138,9	107,2	104,2	116,8
Fator de dissolução (%)	95,3	96,3	96,4	96,0

Tabela II.23- Dados da tomada de concentração ao longo da posição para o experimento fora da malha em triplicata.

Posição (m)	Conc. (g/l) Exp.(a)	Conc. (g/l) Exp.(b)	Conc. (g/l) Exp.(c)	Média da triplicata (g/l)	Desvio padrão (δ)
5,5	44,87	44,79	45,40	45,02	0,33
13,0	51,02	51,58	52,30	51,63	0,64
20,5	51,26	51,66	52,74	51,89	0,77
26,7	53,09	53,26	53,82	53,89	0,38
Desvio Padrão Médio					0,53

Tabela II.24- Teste ANOVA realizado para o experimento fora da malha em triplicata.

p-valor	0,877
Significância	Não significativo

Tabela II.25- Teste t realizado para os pares de amostras de concentração do experimento fora da malha ao longo da posição.

Pares de concentração média (g/L)	45,02 e 51,63	51,63 e 51,89	51,63 e 53,89
Intervalo entre as posições (m)	5,5 a 13,0	13,0 a 20,5	13,0 a 26,7
p-valor	0,00125	0,1355	0,1482
Significância	Significativo	Não significativo	Não Significativo

ANEXO III

DADOS SIMULADOS

III.1 Simulação do experimento 1

Tabela III.1- Simulação dos perfis de concentração, temperatura e fração volumétrica de sólidos do experimento 1.

Posição (m)	Concentração (g/l)	Temperatura (K)	Fração Volumétrica
0,00	32,00	303,0	0,01085
0,97	39,00	302,8	0,00670
1,93	42,61	302,7	0,00527
2,90	44,92	302,6	0,00414
3,87	46,55	302,6	0,00325
4,83	47,81	302,6	0,00256
5,80	48,79	302,6	0,00201
6,77	49,56	302,5	0,00158
7,73	50,15	302,5	0,00124
8,70	50,62	302,5	0,00098
9,67	50,98	302,5	0,00077
10,63	51,26	302,5	0,00060
11,60	51,48	302,5	0,00047
12,57	51,65	302,5	0,00037
13,53	51,78	302,5	0,00029
14,50	51,88	302,5	0,00023
15,47	51,96	302,5	0,00018
16,43	52,03	302,5	0,00014
17,40	52,08	302,5	0,00011
18,37	52,12	302,5	0,00009
19,33	52,14	302,5	0,00007
20,30	52,17	302,5	0,00005
21,27	52,19	302,5	0,00004
22,23	52,20	302,5	0,00003
23,20	52,21	302,5	0,00003
24,17	52,22	302,5	0,00002
25,13	52,23	302,5	0,00002
26,10	52,23	302,5	0,00001
27,07	52,24	302,5	0,00001
28,03	52,24	302,5	0,00001
29,00	52,24	302,5	0,00001

III.2 Simulação do experimento 2

Tabela III.2- Simulação dos perfis de concentração, temperatura e fração volumétrica de sólidos do experimento 2.

Posição (m)	Concentração (g/l)	Temperatura (K)	Fração Volumétrica
0,00	32,00	303,0	0,02126
0,97	46,40	302,6	0,01305
1,93	53,43	302,5	0,00980
2,90	57,53	302,4	0,00758
3,87	60,52	302,4	0,00585
4,83	62,80	302,4	0,00452
5,80	64,53	302,3	0,00349
6,77	65,85	302,3	0,00270
7,73	66,85	302,3	0,00209
8,70	67,62	302,3	0,00161
9,67	68,21	302,3	0,00125
10,63	68,66	302,3	0,00096
11,60	69,00	302,3	0,00074
12,57	69,27	302,3	0,00057
13,53	69,47	302,3	0,00044
14,50	69,62	302,3	0,00034
15,47	69,74	302,2	0,00026
16,43	69,83	302,2	0,00020
17,40	69,90	302,2	0,00015
18,37	69,96	302,2	0,00012
19,33	70,00	302,2	0,00009
20,30	70,03	302,2	0,00007
21,27	70,05	302,2	0,00006
22,23	70,07	302,2	0,00004
23,20	70,08	302,2	0,00003
24,17	70,09	302,2	0,00003
25,13	70,10	302,2	0,00002
26,10	70,11	302,2	0,00002
27,07	70,12	302,2	0,00001
28,03	70,12	302,2	0,00001
29,00	70,13	302,2	0,00001

III.3 Simulação do experimento 3

Tabela III.3- Simulação dos perfis de concentração, temperatura e fração volumétrica de sólidos do experimento 3.

Posição (m)	Concentração (g/l)	Temperatura (K)	Fração Volumétrica
0,00	32,00	303,0	0,00562
0,97	35,32	302,8	0,00360
1,93	37,35	302,8	0,00272
2,90	38,81	302,8	0,00213
3,87	39,78	302,7	0,00167
4,83	40,35	302,7	0,00131
5,80	40,87	302,7	0,00103
6,77	41,28	302,7	0,00081
7,73	41,59	302,7	0,00063
8,70	41,84	302,7	0,00050
9,67	42,03	302,7	0,00039
10,63	42,18	302,7	0,00031
11,60	42,29	302,7	0,00024
12,57	42,38	302,7	0,00019
13,53	42,45	302,7	0,00015
14,50	42,51	302,7	0,00012
15,47	42,55	302,7	0,00009
16,43	42,58	302,7	0,00007
17,40	42,61	302,7	0,00006
18,37	42,63	302,7	0,00004
19,33	42,64	302,7	0,00003
20,30	42,66	302,7	0,00003
21,27	42,66	302,7	0,00002
22,23	42,67	302,7	0,00002
23,20	42,68	302,7	0,00001
24,17	42,68	302,7	0,00001
25,13	42,69	302,7	0,00001
26,10	42,69	302,7	0,00001
27,07	42,69	302,7	0,00000
28,03	42,69	302,7	0,00000
29,00	42,69	302,7	0,00000

III.4 Simulação do experimento 4

Tabela III.4- Simulação dos perfis de concentração, temperatura e fração volumétrica de sólidos do experimento 4.

Posição (m)	Concentração (g/l)	Temperatura (K)	Fração Volumétrica
0,00	32,00	303,0	0,01031
0,97	38,71	302,8	0,00632
1,93	42,00	302,7	0,00496
2,90	44,15	302,7	0,00389
3,87	45,71	302,7	0,00305
4,83	46,93	302,6	0,00239
5,80	47,88	302,6	0,00187
6,77	48,62	302,6	0,00147
7,73	49,20	302,6	0,00115
8,70	49,65	302,6	0,00090
9,67	50,01	302,6	0,00070
10,63	50,28	302,6	0,00055
11,60	50,50	302,6	0,00043
12,57	50,67	302,6	0,00034
13,53	50,81	302,5	0,00027
14,50	50,91	302,5	0,00021
15,47	50,99	302,5	0,00016
16,43	51,06	302,5	0,00013
17,40	51,11	302,5	0,00010
18,37	51,15	302,5	0,00008
19,33	51,18	302,5	0,00006
20,30	51,20	302,5	0,00005
21,27	51,22	302,5	0,00004
22,23	51,24	302,5	0,00003
23,20	51,25	302,5	0,00002
24,17	51,26	302,5	0,00002
25,13	51,26	302,5	0,00001
26,10	51,27	302,5	0,00001
27,07	51,27	302,5	0,00001
28,03	51,28	302,5	0,00001
29,00	51,28	302,5	0,00001

III.5 Simulação do experimento fora da malha

Tabela III.5- Simulação dos perfis de concentração, temperatura e fração volumétrica de sólidos do experimento fora da malha experimental.

Posição (m)	Concentração (g/l)	Temperatura (K)	Fração Volumétrica
0,00	32,00	303,0	0,01123
0,97	36,63	302,8	0,00881
1,93	40,22	302,7	0,00691
2,90	43,00	302,6	0,00542
3,87	45,17	302,6	0,00425
4,83	46,86	302,6	0,00334
5,80	48,18	302,6	0,00262
6,77	49,21	302,5	0,00205
7,73	50,01	302,5	0,00161
8,70	50,65	302,5	0,00126
9,67	51,14	302,5	0,00099
10,63	51,53	302,5	0,00078
11,60	51,83	302,5	0,00061
12,57	52,07	302,5	0,00048
13,53	52,25	302,5	0,00038
14,50	52,40	302,5	0,00029
15,47	52,51	302,5	0,00023
16,43	52,60	302,5	0,00018
17,40	52,67	302,5	0,00014
18,37	52,73	302,5	0,00011
19,33	52,77	302,5	0,00009
20,30	52,81	302,5	0,00007
21,27	52,83	302,5	0,00005
22,23	52,85	302,5	0,00004
23,20	52,87	302,5	0,00003
24,17	52,88	302,5	0,00003
25,13	52,89	302,5	0,00002
26,10	52,90	302,5	0,00002
27,07	52,91	302,5	0,00001
28,03	52,91	302,5	0,00001
29,00	52,92	302,5	0,00001

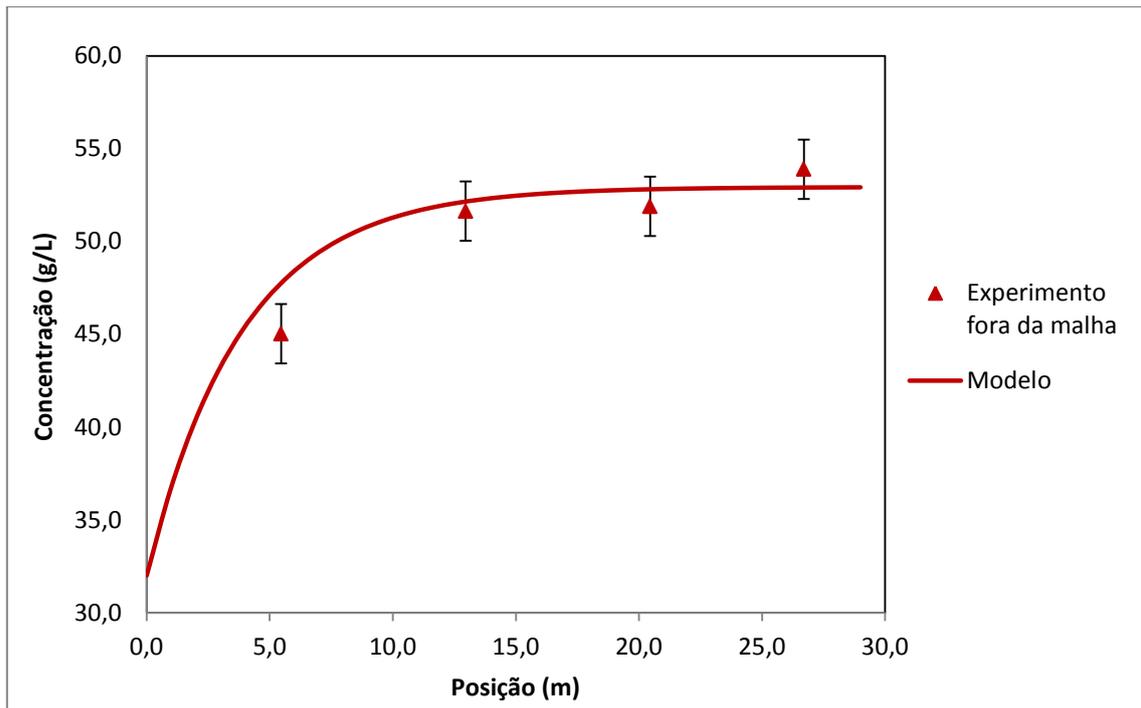


Figura III.1- Dados experimentais e simulados de concentração de sal em função da posição para o experimento fora da malha.

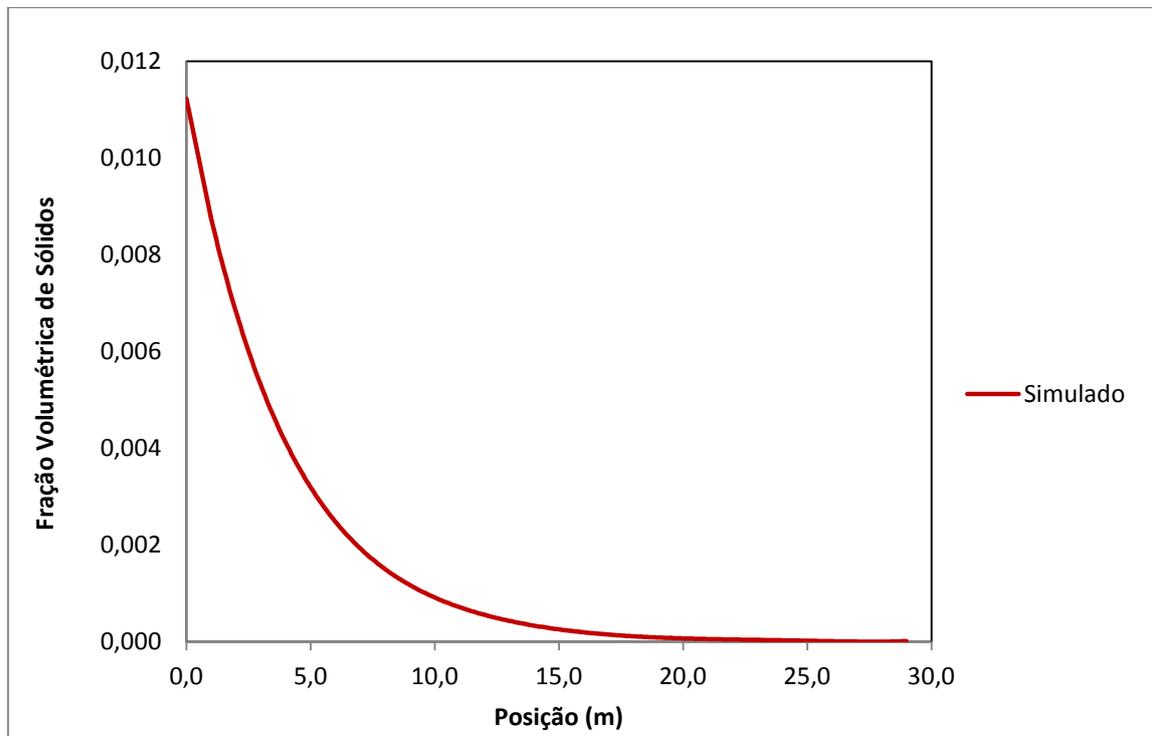


Figura III.2- Resultados obtidos para a simulação dos dados de fração volumétrica de sólidos em função da posição para os dados fora da malha experimental.

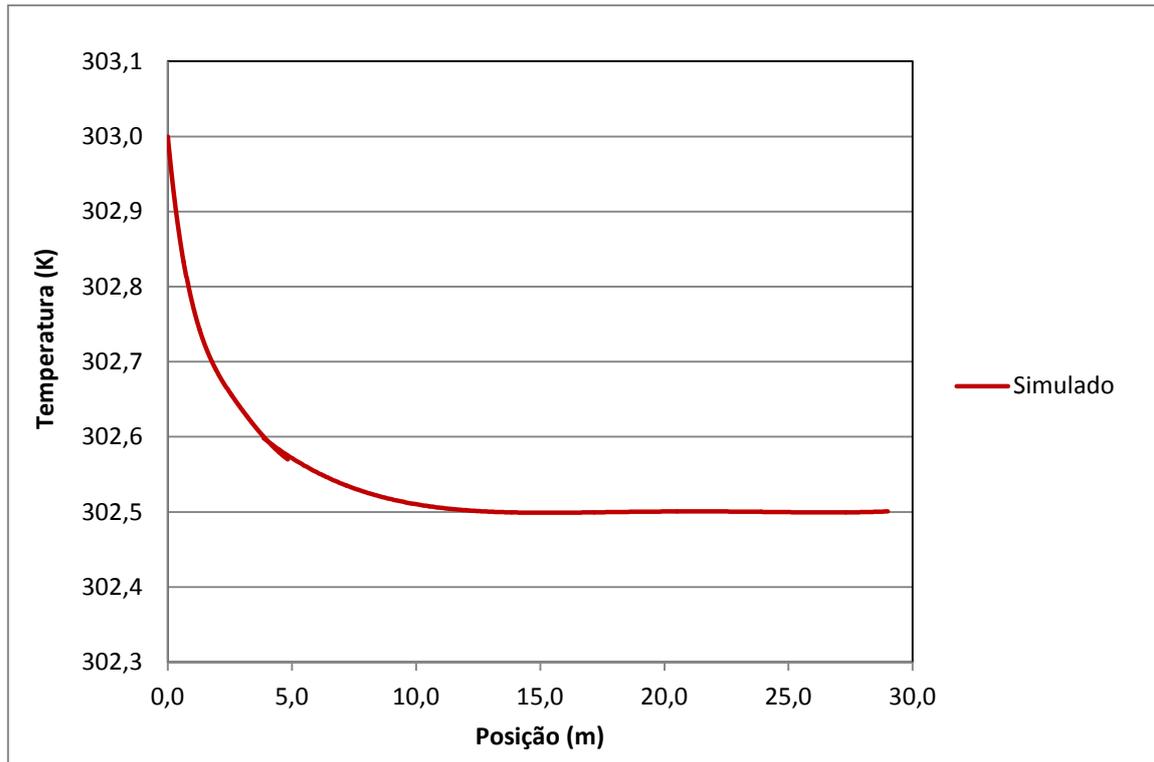


Figura III.3- Resultados obtidos para a simulação do perfil de temperatura em função da posição para os dados fora da malha experimental.