

## ESTUDO PRELIMINAR DA DINÂMICA DE DISSOLUÇÃO DE SAIS

S.C. MAGALHÃES FILHO<sup>1</sup>, A. L. MARTINS<sup>2</sup>, L. A. CALÇADA<sup>1</sup>, C. M. SCHEID<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Inst. de Tecnologia, Dep. de Engenharia Química  
BR 465, Km 7, Seropédica, RJ, CEP: 23890-000. E-mail\*: scheid@ufrj.br

<sup>2</sup>Petrobrás S/A, Cenpes, PDP, TEP.

Av. Hum, Quadra 07, Ilha do Fundão, RJ, CEP 21494-900

**RESUMO** – No escopo da indústria petrolífera e suas atividades de perfuração na camada pré-sal, este trabalho traz um estudo preliminar do processo de dissolução dinâmica de sal grosso comercial em salmouras. Por meio de uma unidade experimental, foram avaliadas diferentes condições operacionais para este processo. A principal variável de interesse é o diâmetro médio da amostra após ter passado pelo processo dissolutivo, este diâmetro, para efeito de caracterização, foi determinado como o diâmetro médio de Sauter. Neste estudo, a dissolução do sal está caracterizada pela redução do seu diâmetro médio (médio de cada amostra). As variáveis operacionais de manipulação são a vazão volumétrica de salmoura, vazão mássica de sal, comprimento de residência, concentração da salmoura e diâmetro inicial da amostra de sal. As variáveis de saída de cada experimento são o diâmetro final da amostra de sal e a massa total dissolvida. Como consequência desta metodologia, uma correlação empírica foi proposta visando nortear a influência que cada variável possui sobre o diâmetro final da amostra.

### INTRODUÇÃO

Os desafios vivenciados pela indústria petrolífera brasileira na camada pré-sal motivam o desenvolvimento de novas tecnologias para superar seus limites técnicos. Atualmente, um dos problemas relatados pela indústria está na etapa de transposição da camada de sal. Nesta etapa, os cascalhos deste material, gerados na operação de perfuração, são parcialmente dissolvidos no fluido de perfuração durante o seu transporte até a superfície. A dissolução do sal altera as propriedades físicas do fluido de perfuração prejudicando as operações naquele poço (THOMAS, 2004). Neste contexto, este trabalho propõe um estudo do processo dissolutivo de sal comercial em salmouras, sendo este processo caracterizado por meio da determinação granulométrica das amostras de

sal antes e após os testes. Para este estudo foi construída uma unidade experimental preliminar, composta por três calhas de seis metros, uma bomba centrífuga, um alimentador de sólidos, um tanque de alimentação, tubos e válvulas de uma polegada e estruturas metálicas para apoio e sustentação. É importante lembrar que os métodos e processo adotados para a análise dessa dissolução não guardam uma fiel reprodução do processo real, sendo o escopo deste trabalho uma análise preliminar.

Para a avaliação dos resultados, uma metodologia foi proposta visando entender qualitativamente e quantitativamente como as condições operacionais favorecem ou desfavorecem a dissolução do sal. O processo adotado no laboratório não reproduziu as condições de campo, porém, existe similaridade entre estas variáveis. Por

exemplo, a vazão mássica visa contemplar a taxa de penetração de sal no poço durante a transposição da camada de sal, a vazão volumétrica faz menção à vazão de bombeio do fluido de perfuração, o comprimento de calha refere-se ao comprimento do poço, o diâmetro inicial médio da amostra refere-se ao tamanho médio dos cascalhos gerados pela broca e a concentração inicial da salmoura faz menção à salinidade inicial do fluido utilizado na perfuração.

Para a interpretação quantitativa dos resultados obtidos, uma correlação empírica baseada em análise dimensional foi proposta, sendo o ajuste dos parâmetros feito com o auxílio do software STATISTICA®.

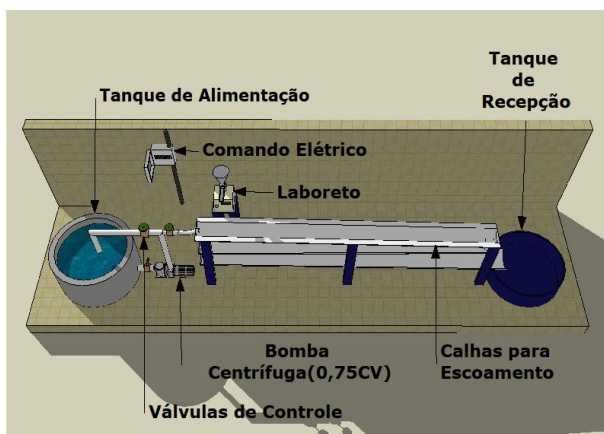
## MATERIAIS E MÉTODOS

### A Unidade Experimental.

Para o estudo do processo de dissolução dinâmica do sal em salmouras, construiu-se uma unidade experimental que pode ser visualizada nas figuras 1 e 2.



**Figura 1:** Foto da Unidade Experimental de Escoamento de Sais.



**Figura 2:** Desenho Esquemático da Unidade Experimental de Escoamento de Sais.

Esta unidade consiste basicamente de uma bomba centrífuga CAM W4C,  $\frac{3}{4}$  cv, DANCOR, dois tanques de polietileno de alta densidade, tubos de uma polegada, válvulas, três calhas de setenta e sete milímetros de diâmetro com seis metros de comprimento cada uma, um alimentador de sólidos vibratório e armações de ferro para sustentação das calhas.

O processo de dissolução dinâmica do sal se dá quando o mesmo é impelido a escoar junto com a solução salina pelas calhas, sendo estas interligadas. Ao final das mesmas o líquido é armazenado no tanque de recepção e o sólido recolhido em uma peneira de Mesh 100.

A alimentação contínua do sólido é feita pelo alimentador de sólidos, denominado de Laboreto, que é um aparelho capaz de armazenar uma determinada massa de sólidos ligada a uma rampa vibratória, que impele o sólido a escoar. Importante dizer que a vazão mássica de sólidos é constante ao longo do tempo, seu controle é feito pelo grau de vibração que o aparelho é capaz de produzir e sua aferição é feita por técnica gravimétrica. A alimentação de sólidos pode ser feita em qualquer lugar da calha, uma vez que o Laboreto é completamente móvel (ver figura 3).

A alimentação contínua de solução salina é feita pela bomba centrífuga, que diferentemente do Laboreto, despeja a solução sempre no início das calhas. A salmoura escoá pelas calhas com vazão constante até ser recolhida no final das mesmas. A vazão é controlada pela manipulação das válvulas existentes no recalque e aferida no final das calhas por meio de técnica gravimétrica.

Uma observação importante deve ser feita concernente ao início de cada experimento. Ambos os fluxos devem se encontrar ao mesmo tempo. Por exemplo, o fluxo líquido é sempre alimentado no início das calhas, se o laboreto estiver também despejando seus sólidos nesse mesmo lugar ambos os aparelhos serão ligados ao mesmo tempo. Mas sendo o laboreto móvel, pode-se desejar que seu despejo seja feito em outro ponto da calha, para tanto, deve-se ligar a bomba primeiro e o laboreto só será iniciado quando o fluxo líquido encontrar o ponto de despejo do fluxo sólido.

O sal recolhido na peneira é deslocado com um pincel para que não haja recaimento da solução sobre o mesmo, causando uma dissolução adicional indesejada.



**Figura 3:** Foto do Alimentador de Sólidos, Laboreto.

### **Matéria-Prima.**

A matéria-prima eleita dentre os sais comerciais foi o cloreto de sódio em forma de sal grosso comercial. O material foi adquirido em pequenas amostras de um quilo e meio aproximadamente. Dois principais cuidados foram tomados para evitarem erros de cálculo e balanço de massa. O primeiro foi baseado no conhecimento geral de que o cloreto de sódio é higroscópico, então a estocagem desse material deve ser adequada. É importante conhecer a massa de água que já está previamente incorporada ao sal antes do mesmo ser submetido ao processo de dissolução. Deve-se também conhecer a taxa de adsorção de água ao longo do tempo de exposição à atmosfera, uma vez que as amostras estão eventualmente nessa condição de exposição por conta do manuseio.

O segundo está relacionado com variação da distribuição granulométrica de cada amostra comprada, para tanto foi proposta a homogeneização das mesmas por técnica de quartearamento de forma que todos os diâmetros médios das amostras ficassem aproximados. O objetivo foi retirar da malha de experimentos esta variável de manipulação, diminuindo assim o número de experimentos. Para colaborar ainda mais com a homogeneização da amostra, as mesmas eram submetidas à peneiração e o mesh superior era descartado.

Estocagem: As amostras comerciais foram todas misturadas em apenas uma amostra total, que então foi homogeneizada e separada em sacos plásticos cada um com aproximadamente 1500 gramas, vide figura 4. Todas as amostras foram armazenadas em um isopor para evitar o ganho de massa em forma de umidade com o tempo.



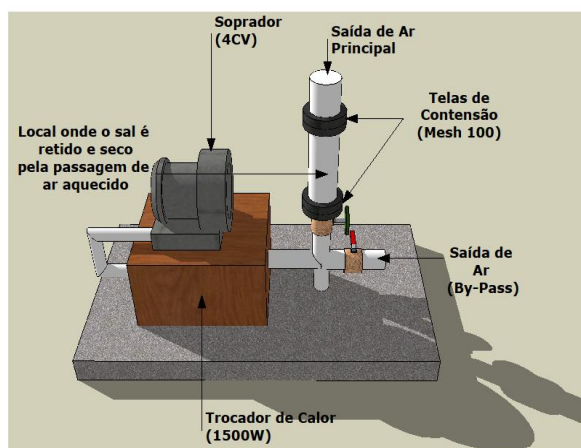
**Figura 4:** Processo de Homogeneização da Matéria-Prima.

### **Secagem Pós Teste.**

Para o procedimento pós teste, a principal questão foi o método para a secagem do sal que advém do processo de dissolução. A secagem do sal se faz necessária devido ao interesse na nova granulometria formada e não há como aferi-la com o sal molhado.

Secagem em Estufa: Um primeiro método avaliado foi à secagem em estufa, a 150 graus Celsius. O processo consistiu em colocar o sal em um recipiente inerte, ficando o mesmo estaticamente dentro da estufa até a total evaporação da umidade presente.

Secagem Dinâmica: Outro processo de secagem considerado foi o processo convectivo, idealizado a partir da pesquisa sobre os processos de secagem usados pela indústria de sal. Para este segundo, uma pequena unidade de secagem foi construída, contendo basicamente tubos, válvulas, um soprador de 4cv, um sistema contendo resistências para um eventual aquecimento do ar, flanges e telas de contenção com Mesh 100 para aprisionamento do sal. A figura 5 mostra a unidade de secagem.



**Figura 5:** Desenho Esquemático da Unidade de Secagem Dinâmica de Sal.

O processo convectivo de secagem do sal se dá uma vez que o mesmo está aprisionado entre os flanges (com tela) com o fluxo de ar permeando-o, carregando a umidade e promovendo jorros que não permitem sua aglomeração, ou seja, o processo é dinâmico.

Este método de secagem levanta duas questões relevantes: O cisalhamento das partículas durante a secagem causaria a destruição de sua granulometria? Quanto tempo seria necessário para uma determinada massa de sal estar completamente seca? Testes foram conduzidos para responder a estas duas questões e seus resultados são mostrados na seção a seguir.

### Malha de Experimentos.

A tabela 1 mostra a malha de experimentos montada. A rotina consistiu em fixar três variáveis e manipular uma sempre entre dois valores, um máximo e um mínimo.

Para compreensão dos termos da tabela, afirmando que o comprimento de calha varia entre 18 e 6 metros, isso implica em entender que o Laboreto foi colocado em dois pontos distintos para alimentação. As porcentagens são referentes à concentração inicial da solução salina sobre a concentração de saturação da água. É conhecido na literatura que o ponto de saturação da água se dá a 360 g/l. As concentrações usadas foram a 25% e 50% deste valor. (PERRY, R. H. & CHILTON, H. C).

Os termos  $W_{mín}$  e  $Q_{mín}$  significam vazão mássica mínima e vazão volumétrica mínima, seus valores foram arbitrados em aproximadamente 11g/s e 0,5 l/s. Já os termos  $W_{máx}$  e  $Q_{máx}$  significam vazão mássica

máxima e vazão volumétrica máxima, e seus valores são aproximadamente 24 g/s e 1,0 l/s. Apesar destes valores serem arbitrados, existe uma determinação mínima a ser seguida: a vazão mínima de salmoura deve ser capaz de conduzir a vazão mássica máxima de sal.

**Tabela 1:** Malha de experimentos.

Exp.	C (adm)	W (g/s)	CR (m)	Q (l/s)
1	25%	$W_{mín}$	18	$Q_{mín}$
2	25%	$W_{máx}$	18	$Q_{mín}$
3	25%	$W_{mín}$	6	$Q_{mín}$
4	25%	$W_{máx}$	6	$Q_{mín}$
5	25%	$W_{mín}$	6	$Q_{máx}$
6	25%	$W_{máx}$	18	$Q_{máx}$
7	25%	$W_{mín}$	18	$Q_{máx}$
8	25%	$W_{máx}$	6	$Q_{máx}$
9	50%	$W_{mín}$	18	$Q_{mín}$
10	50%	$W_{máx}$	18	$Q_{mín}$
11	50%	$W_{máx}$	6	$Q_{mín}$
12	50%	$W_{mín}$	6	$Q_{mín}$
13	50%	$W_{mín}$	6	$Q_{máx}$
14	50%	$W_{máx}$	18	$Q_{máx}$
15	50%	$W_{mín}$	18	$Q_{máx}$
16	50%	$W_{máx}$	6	$Q_{2máx}$

### Metodologia dos Testes.

Para a variável dependente do processo, a sigla dps foi criada, que significa diâmetro médio de saída (Sauter). É o diâmetro da amostra após ter passado pelo processo dissolutivo, que nada mais é do que a análise granulométrica após estar completamente seca.

Resumindo temos preliminarmente cinco variáveis independentes (Q, C, W, CR, dps) para manipulação e uma variável dependente (dps), a qual se espera correlacionar com as demais. Importante relembra que dps está fixada em um valor médio, então não representa uma variável, e sim um termo constante.

### Repetitividade dos Experimentos.

Com o objetivo de verificar a credibilidade dos dados aferidos, a estabilidade da unidade e o erro experimental, dois experimentos foram repetidos em condições operacionais semelhantes. Os resultados obtidos constam na próxima seção.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Resultados dos Testes na Matéria-Prima.

Análise de adsorção e dessorção: Como abordado na seção anterior, faz-se vista a preocupação com o manuseio da amostra, uma vez que o cloreto de sódio adsorve umidade com facilidade. O teste de adsorção visa nortear a quantidade de água que o sal adsorve quando exposto à atmosfera e determina o tempo máximo de manuseio da amostra sem problemas de erro. O teste de dessorção vem quantificar a massa de água que inicialmente está incorporada na amostra estocada.

Concernente a metodologia destes testes, a adsorção foi verificada por meio de sucessivas pesagens de uma amostra de massa definida exposta a atmosfera, a temperatura ambiente. A subtração entre a pesagem momentânea (massa de sal mais água a cada ponto de verificação) e a massa inicial de sal no tempo zero representa a massa de água que está sendo incorporada até aquele presente momento. Para a dessorção, uma amostra de massa definida foi pesada e depois levada à estufa por 24 horas. Após este período sua massa foi novamente verificada e a subtração entre as mesmas fornece a massa de água perdida.

As tabelas 2 e 3 mostram os resultados obtidos.

**Tabela 2:** Teste de adsorção de água.

Tempo (min)	Massa Adquirida (%)
0	0
30	0,66
60	0,50
90	0,69
120	0,97
1440	4,27

**Tabela 3:** Teste de dessorção de água.

Tempo (min)	Massa perdida (%)
0	0
1440	0,034

Na tabela 2 verifica-se que o sal após 1440 min. (24h) adsorve um pouco mais que 4% de sua massa inicial em forma de água. Isso nos permite afirmar que os testes podem ser conduzidos normalmente, pois a adsorção de água é desprezível, uma vez que a

exposição à atmosfera da amostra não suplanta 120 minutos.

Observando a tabela 3, é inferido de que nenhum cuidado é necessário para a amostra inicial em termos de pré-secagem. A quantidade de água presente na amostra não representa nem 0,1% da massa total de sal.

### Resultados dos testes na secagem do sal após processo de dissolução.

Processo de secagem em estufa: Para o processo de secagem em estufa, os resultados obtidos concernente à condição física do sal são mostrados na figura 6.

O processo de secagem em estufa gera incrustação nos recipientes e aglomeração do sal. Ressalta-se que o recipiente possui um revestimento de teflon, material este com propriedades antiaderentes, e ainda sim a incrustação é muito significativa, o que impossibilita sua análise granulométrica.



**Figura 6:** Aspecto do Sal Seco Após Processo de Secagem em Estufa.

Processo de secagem por meio de secagem dinâmica: O processo de secagem em estufa foi substituído pelo processo de secagem dinâmica, na unidade de secagem cujo esquema já foi mostrado anteriormente. O sal após este processo está completamente solto, permitindo que seja feita sua análise granulométrica sem problemas operacionais. O aspecto do sal seco advindo é visto na figura 7.



**Figura 7:** Aspecto do Sal Seco Após Processo de Secagem Dinâmica.

Sendo este o processo adotado para a secagem do sal, quanto tempo seria necessário para uma determinada massa de sal estar completamente seca? O cisalhamento das partículas durante a secagem causaria a destruição de sua granulometria?

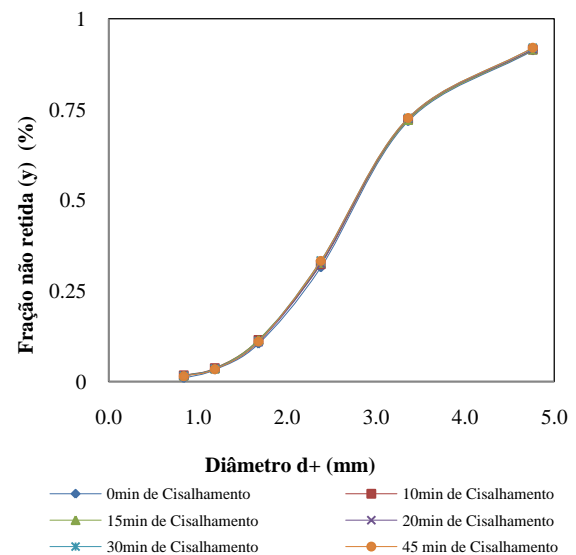
Para responder a pergunta, o seguinte teste foi conduzido: 1100 gramas de sal foram completamente imersos em solução salina e depois retirados (essa massa foi arbitrada baseada na situação mais difícil de secagem encontrada até aquele momento, lembrando que a massa inicial está fixada em 1500 gramas). Antes de deslocar essa massa para o secador, uma pré-secagem com papel absorvente é feita para se retirar o excesso de água. Após seu término, o sal úmido é levado para o secador por 45 minutos (tempo de residência). Esse tempo foi arbitrado com base no testemunho ocular da formação de pó, o que é um indicativo de ausência de umidade. Retirado o sal do secador, amostras com massas já definidas e em triplicata são levadas à estufa para secagem a 150 graus Celsius por 1440 min. (24h). A comparação das massas de sal antes e depois da estufa norteou o quanto de água ainda continha no sal depois da secagem dinâmica. Após 24 horas o sal perdeu aproximadamente 0,434% da massa inicial (antes de ir à estufa), isso indica que o processo convectivo de secagem dinâmica é eficiente.

Para investigar se o tempo de residência no secador destrói as partículas de sal pelo cisalhamento constante, um segundo experimento foi conduzido. Este consistiu em colocar 1000 gramas de sal seco no secador, com diâmetro médio de Sauter já definido e

conhecido, e a cada tempo definido essa amostra era retirada e levada a análise granulométrica para a verificação da nova situação de distribuição granulométrica, a tabela 4 e a figura 8 mostram os resultados.

**Tabela 4:** Teste de cisalhamento e comparação dos diâmetros médios de Sauter.

Tempo de Cisalhamento (min)	Diâmetro médio de Sauter (mm)
0	2,180
15	2,195
20	2,188
30	2,180
45	2,176



**Figura 8:** Análises granulométricas a cada ponto de verificação.

Verificam-se na figura 8 que as análises granulométricas de cada tempo de secagem estão praticamente sobrepostas umas as outras, indicando que não houve significativa mudança no perfil granulométrico durante o cisalhamento. Isto é corroborado observando a tabela 4, onde é percebida uma mudança não significativa nos diâmetros médios de Sauter.

### Resultados obtidos para a malha de experimentos.

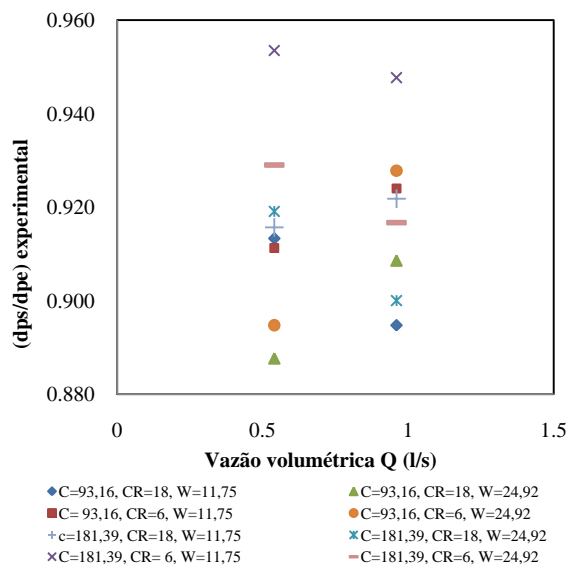
Na tabela 5 é mostrada a malha de experimentos executados e os resultados experimentais médios obtidos, seguindo a metodologia proposta anteriormente (tabela 1). Os valores de Q, W e C não puderam ser reproduzidos com exatidão de experimento para experimento, logo se usou suas respectivas médias, tanto para os valores

máximos quanto para os mínimos. Esta afirmação é mostrada nas figuras 9, 10 e 11, onde também é feita a avaliação dos efeitos dessas variáveis sobre dps. Como também não foi possível obter-se a cada amostra inicial um diâmetro médio idêntico, ao invés da média, a relação dps/dpe foi criada. Desta maneira torna-se possível avaliar o quanto que dps ainda representa da amostra original.

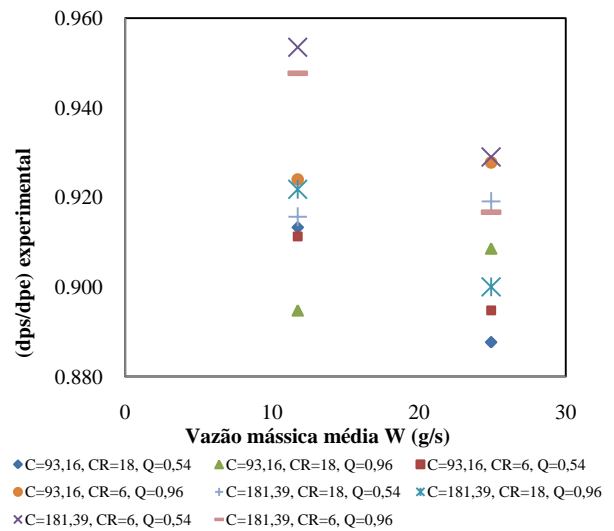
A coluna em azul é a variável obtida a partir dos experimentos executados, e as verdes são as relações de interesse.

**Tabela 5: Resultados médios experimentais para dps.**

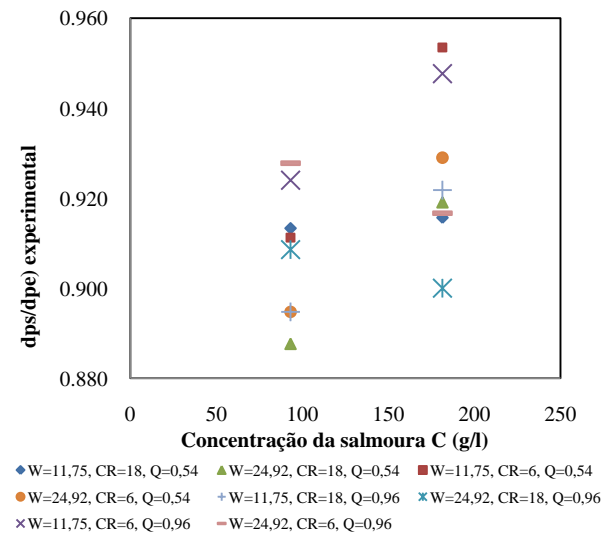
Exp.	C (g/l)	W (g/s)	CR (m)	Q (l/s)	dpe (mm)	dps (mm)	dps /dpe	FD (%)
1	93,16 (25%)	11,75	18,00	0,54	1,73	1,58	0,913	74,15
2	93,16 (25%)	24,92	18,00	0,54	1,78	1,58	0,888	72,78
3	93,16 (25%)	11,75	6,00	0,54	1,69	1,54	0,911	49,55
4	93,16 (25%)	24,92	6,00	0,54	1,71	1,53	0,895	54,07
5	93,16 (25%)	11,75	6,00	0,96	1,71	1,58	0,924	45,85
6	93,16 (25%)	24,92	18,00	0,96	1,75	1,59	0,909	70,64
7	93,16 (25%)	11,75	18,00	0,96	1,71	1,53	0,895	67,82
8	93,16 (25%)	24,92	6,00	0,96	1,80	1,67	0,928	38,81
9	181,39 (50%)	11,75	18,00	0,54	1,66	1,52	0,916	55,45
10	181,39 (50%)	24,92	18,00	0,54	1,73	1,59	0,919	55,51
11	181,39 (50%)	24,92	6,00	0,54	1,69	1,57	0,929	32,79
12	181,39 (50%)	11,75	6,00	0,54	1,72	1,64	0,953	28,00
13	181,39 (50%)	11,75	6,00	0,96	1,72	1,63	0,948	28,47
14	181,39 (50%)	24,92	18,00	0,96	1,70	1,53	0,900	54,42
15	181,39 (50%)	11,75	18,00	0,96	1,79	1,65	0,922	47,44
16	181,39 (50%)	24,92	6,00	0,96	1,80	1,65	0,917	24,33



**Figura 9: Análise do efeito de Q médio sobre dps/dpe.**



**Figura 10: Análise do efeito de W médio sobre dps/dpe.**



**Figura 11: Análise do efeito de C médio sobre dps/dpe.**

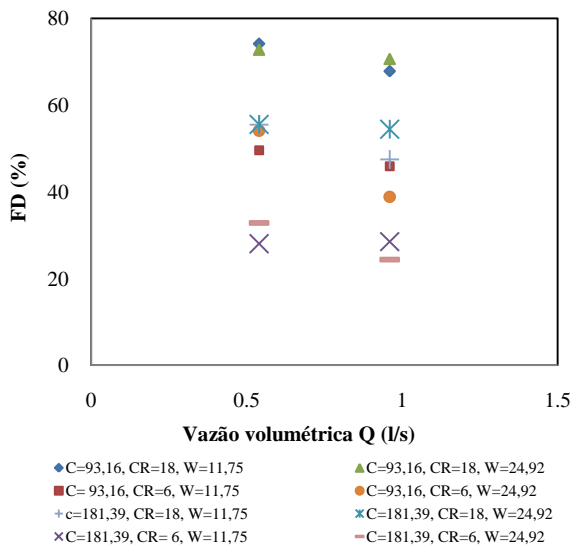
As figuras 9 e 10 apresentam a relação dps/dpe contra Q médio e W médio respectivamente. Para a análise destas figuras, esperava-se que todos os valores de dps/dpe aumentassem ou diminuíssem e isto não é observado. Observam-se tendências contraditórias, o que impossibilita conclusões acerca do efeito de Q e W sobre dps. Já na figura 11, seis dos oito pontos apontam para um aumento no valor da relação de dps/dpe, podendo-se entender que o aumento da concentração de salmoura prejudica a dissolução do sal. Isto é justificável e bem entendido, demonstrado na literatura como efeito do íon comum. (FELTRE, 2003).

Para entender melhor os efeitos de Q e W sobre a dissolução, uma segunda avaliação foi proposta, baseada no balanço de massa

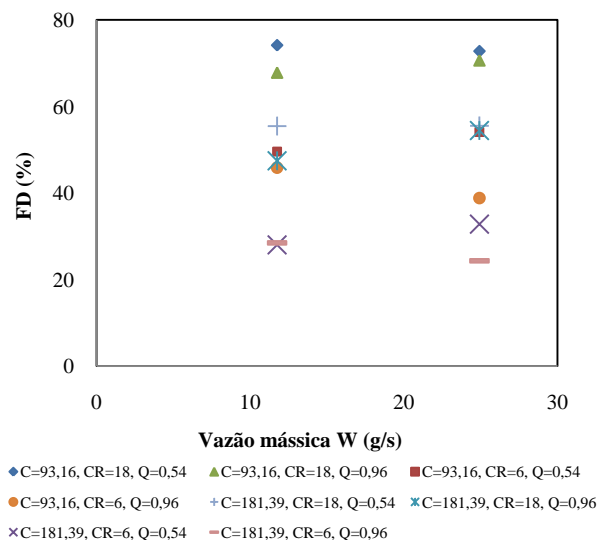
entre a massa inicial e a massa final. Este balanço consta como a sigla FD (fator de dissolução), onde:

$$FD(\%) = \left( \frac{\text{massa inicial} - \text{massa final}}{\text{massa inicial}} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

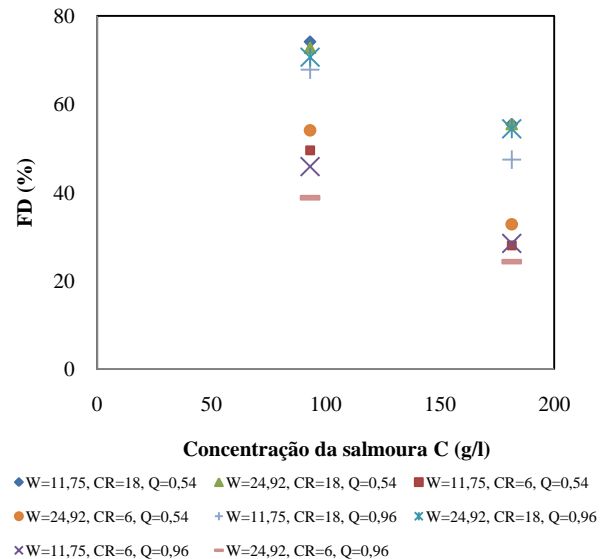
Nas figuras 12, 13 e 14 são demonstradas as relações entre FD e as mesmas condições operacionais abordadas anteriormente.



**Figura 12:** Análise do efeito de Q médio sobre FD (%).



**Figura 13:** Análise do efeito de W médio sobre FD (%).



**Figura 14:** Análise do efeito de C médio sobre FD (%).

Observando as respectivas figuras 12, 13 e 14, pode-se notar uma evidência mais clara do efeito de Q, W e C sobre a dissolução. Baseado na figura 12 afirma-se que de uma maneira geral, para o sistema adotado, o aumento da vazão volumétrica tende a prejudicar a dissolução. Uma explicação para este fato está no tempo de residência de contato entre soluto e solução, uma vez que fica reduzido quando uma vazão maior é aplicada. Já os efeitos sobre a dissolução da vazão mássica continuam inconclusivos, visto a tendência contraditória que se repete na figura 13. Para o efeito de C em FD, os resultados mostrados na figura 14 corroboram com aqueles apresentados na figura 11.

### Resultados obtidos para a repetitividade dos experimentos.

Os dados contidos na tabela 5 foram confrontados quanto a sua confiabilidade em termos de desvios experimentais, por meio da repetitividade de alguns experimentos aleatórios. A tabela 6 mostra os resultados obtidos para a repetição do experimento 1 e 15.

**Tabela 6:** Resultados experimentais médios obtidos a partir da repetição das condições operacionais do experimento 1 e 15.

Exp.	C (g/l)	W (g/s)	CR (m)	Q (l/s)	dpe (mm)	dps (mm)	dps/dpe	FD (%)
1	93,16 (25%)	11,75	18	0,54	1,73	1,58	0,913	74,15
1'	93,16 (25%)	11,75	18	0,54	1,74	1,58	0,908	73,35
15	181,3 (50%)	11,75	18	0,96	1,79	1,65	0,922	47,44
15'	181,3 (50%)	11,75	18	0,96	1,80	1,65	0,917	45,01



Pode-se observar que os resultados são similares quando repetidos, isso mostra que a unidade experimental está bem ajustada e dimensionada, bem como a metodologia utilizada produz baixos erros experimentais, abaixo de 6% para os casos relatados na tabela 6.

### Resultados obtidos para a correlação proposta.

O cerne desses resultados é o termo dps em relação às variáveis manipuladas.

Para a correlação empírica, uma análise dimensional foi proposta. O ajuste foi feito excluindo da malha os experimentos 1, 8 e 15, para posterior validação do modelo. O software STATISTICA foi usado como ferramenta computacional.

Matematicamente tem-se:

$$(dps)_f = (C, Q, CR, W, dpe) \quad (2)$$

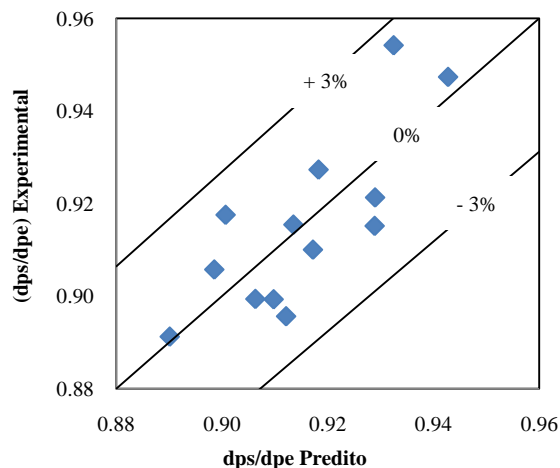
Chegando à seguinte correlação adimensional:

$$\left(\frac{dps}{dpe}\right) = A \cdot \left(\frac{C \cdot Q}{W}\right)^B \cdot \left(\frac{CR}{dpe}\right)^C \quad (3)$$

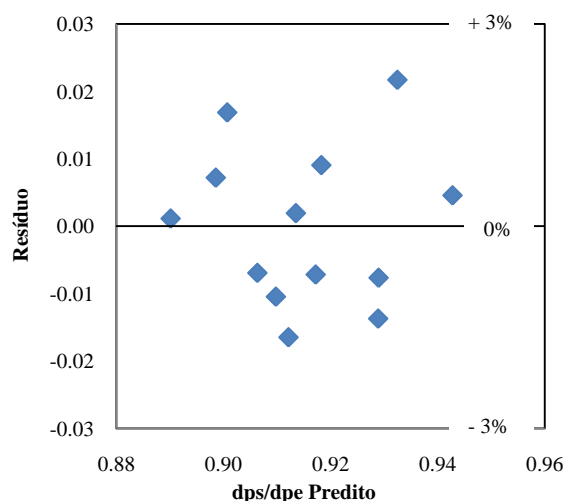
Onde:

$$A = 1,033 ; B = 0,019 ; C = -0,018$$

Para os parâmetros ajustados acima, uma análise residual foi feita a fim de verificar os desvios existentes entre variável experimental e predita. Esta análise está descrita nas figuras 15 e 16.



**Figura 15:** Análise dos desvios entre dps/dpe experimental e predito.



**Figura 16:** Análise residual da relação dps/dpe predita pela correlação.

A figura 15 traz a relação entre os valores experimentais de dps/dpe e os preditos pela correlação (equação 3). Já a figura 16 apresenta os valores preditos de dps/dpe e seus resíduos. Entende-se como resíduo a subtração entre o valor experimental e o predito.

Observam-se em ambas as figuras que os desvios existentes não suplantam 3%.

Para a avaliação do desempenho da correlação, a tabela 7 foi montada, nela está contida os resultados para os experimentos que não participaram do ajuste.

**Tabela 7 – Desempenho do modelo empírico proposto.**

Exp.	dps (Exp)	dps (Corr)	Desvio (%)
1	1,58	1,55	1,9
8	1,67	1,65	1,2
15	1,65	1,65	0

Observando a tabela 7 vemos que os desvios são menores que 2%. O desvio foi considerado como:

$$Desvio = \frac{Valor\ experimental - Valor\ predito}{Valor\ experimental} \quad (4)$$

O modelo mostrou-se válido para a repetição de resultados, desde que não extrapolados.

## CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, as seguintes inferências podem ser feitas.

### Acerca da matéria-prima.

O sal estocado para teste está praticamente seco e sua umidade residual não prejudica o balanço de massa.

A massa de água adsorvida em até 6h não altera significativamente a massa total da amostra, podendo a mesma estar exposta a atmosfera por esse período de tempo sem nenhum problema operacional.

O processo de secagem adotado é o dinâmico, o tempo de secagem ideal para amostras de até 1100 gramas é de 45 minutos, suas partículas não são destruídas durante esse tempo de cisalhamento no secador e essa massa foi provada completamente seca.

### Acerca dos resultados experimentais obtidos.

Os resultados obtidos a partir da análise da redução do diâmetro da amostra original (dps/dpe) deixam dúvidas a respeito das tendências da dissolução frente às variáveis operacionais Q e W. Aliado aos resultados obtidos na avaliação por meio do balanço de massa estas tendências tornaram-se mais claras. Observando todos os resultados apresentados chega-se a conclusão de que, para a avaliação da dissolução o estudo do diâmetro médio de Sauter abordado neste trabalho não é o melhor caminho, e sim o balanço de massa. Como resultado final, aliando ambos à luz da interpretação (diâmetro médio e balanço de massa), conclui-se que:

- O aumento da concentração inicial de salmoura prejudica a dissolução.
- O aumento da vazão volumétrica no sistema de escoamento abordado prejudica a

dissolução, porque causa uma diminuição no tempo de contato entre soluto/solução.

- O efeito da vazão mássica de sal de entrada no sistema permanece inconclusivo. Mais estudos deverão ser feitos ou até mesmo uma mudança na metodologia experimental deve ser considerada.

Os efeitos da variação do diâmetro de entrada e da temperatura não foram estudados, e serão abordados em trabalhos futuros.

### Acerca da correlação proposta.

A correlação produz desvios abaixo de 2% quando utilizada para reproduzir testes fora da malha de ajuste e dentro dos limites experimentais. Produz desvios de uma maneira geral menores que 3% tanto para as relações entre resíduos e dps/dpe predito quanto para as relações de dps/dpe experimental e predito pela correlação.

## NOMENCLATURA

A, B, C são os parâmetros da correlação.

C - concentração da salmoura.

CR - comprimento de calha.

dpe - diâmetro médio da amostra na entrada do experimento.

dps - diâmetro médio da amostra na saída do experimento.

W - vazão mássica de sólidos.

Q - vazão volumétrica da salmoura.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PERRY, R. H. & CHILTON, H. C. Manual de Engenharia Química. 5ª edição. Editora Guanabara Dois, São Paulo: 1980.

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

FELTRE, R. Química Geral Volume Único. 5ª Edição. Editora Scipione, 2003.